



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**MEDİKAL VE ENDÜSTRİYEL SIVILAR İÇİN  
MANYETİK SIVI AKIŞ-HAVA KABARCIĞI  
SENSÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE  
UYGULANMASI**

**Yasin ELHAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran - 2025  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Yasin ELHAN tarafından hazırlanan "MEDİKAL VE ENDÜSTRİYEL SIVILAR İÇİN MANYETİK SIVI AKIŞ-HAVA KABARCIĞI SENSÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI" adlı tez çalışması 18/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

\_\_\_\_\_

#### Danışman

Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

\_\_\_\_\_

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DOĞAN

\_\_\_\_\_

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../ .../2025 gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

FBE Müdürü

Bu tez çalışması, Türkiye Sağlık Enstitüleri Başkanlığı (TÜSEB) tarafından 2023-B-01 numaralı "B Grubu Ar-Ge Proje Çağrısı" kapsamında, 33638 proje numarası ile desteklenmiştir.

Doç. Dr. Emrehan YAVŞAN bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Yasin ELHAN

Tarih: 18/06/2025

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# MEDİKAL VE ENDÜSTRİYEL SIVILAR İÇİN MANYETİK SIVI AKIŞ-HAVA KABARCIĞI SENSÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

Yasin ELHAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

2025, 113 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Abdülsamed TABAK  
Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ  
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DOĞAN

Bu tez çalışması, medikal ve endüstriyel sıvı hatlarında hava kabarcıklarını ve metal partikülleri tespit etmek amacıyla, manyetik algılama prensibine dayalı, temassız ve yüksek hassasiyetli bir sensör sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. İntravenöz (IV) sıvılarda hava kabarcıklarının yol açtığı hava embolisi riski ile endüstriyel sıvılardaki metal partiküllerin sistem verimliliğini düşürmesi gibi kritik güvenlik ve kalite sorunlarına çözüm sunulması hedeflenmiştir. Mevcut optik ve mekanik yöntemlerin; sıvı rengi, bulanıklığı veya viskozitesi gibi dış etkenlerden kolayca etkilenmesi, yüksek maliyet ve karmaşık kurulum gereksinimleri, manyetik alan temelli yaklaşımı daha cazip kılmaktadır. Geliştirilen düzende, akış hattının üst ve altına yerleştirilen “iç içe seri” düzlemsel PCB bobinleri bir LC rezonatör oluşturarak, algılama bölgesinde kararlı bir manyetik tünel alanı üretmektedir. Kabarcık veya partikül geçişi bu alanı bozarak rezonans frekansında ölçülebilir bir kayma yaratmaktadır. Frekans değişimleri, LDC1612 tabanlı frekans-dijital dönüştürücü ile sayısallaştırılmakta, STM32F103 mikrodenetleyicide işlenmekte ve ESP32 Wi-Fi modülü aracılığıyla yerel LCD ekran ile C# tabanlı uzak arayüze gerçek zamanlı olarak aktarılmaktadır. Deneysel, 19,6 – 47 mL/dk debilerde 1,76 mm<sup>3</sup>'e kadar küçük kabarcıkları ve 0,095 mm<sup>3</sup> hacmindeki metal parçacıkları güvenilir biçimde algılandığını göstermiştir. Yüksek Q faktörü ve düşük gürültü seviyesine sahip bobin tasarımı, algılama hassasiyetini belirgin biçimde artırmıştır. Laboratuvar düzeneğinden, 3B yazıcıyla üretilen kompakt ve Faraday kaplamalı nihai prototipe uzanan geliştirme sürecinde; otomatik başlangıç kalibrasyonu ve hareketli ortalama–yüksek geçiren filtre tabanlı anomali tespit algoritması eklenerek çevresel değişkenliklere karşı sistem kararlılığı güçlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen manyetik sensörün hem IV tedavi hatlarında hem de endüstriyel proseslerde düşük maliyetli, kolay entegre edilebilir ve gerçek zamanlı bir izleme çözümü sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Endüktif Algılama, Hava Kabarcığı Algılama, Manyetik Sensör, Metal Partikül Tespiti, Medikal Uygulamalar, Sıvı Akış Sensörü

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A MAGNETIC LIQUID FLOW-AIR BUBBLE SENSOR FOR MEDICAL AND INDUSTRIAL LIQUIDS**

**Yasin ELHAN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHATRONICS ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdülsamed TABAK**

**2025, 113 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Abdülsamed TABAK**

**Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ**

**Asst. Prof. Dr. Hüseyin DOĞAN**

This thesis aims to develop a non-contact and high-precision sensor system based on magnetic sensing principles for the detection of air bubbles and metallic particles in medical and industrial fluid lines. The proposed system addresses critical safety and quality concerns such as the risk of air embolism caused by air bubbles in intravenous (IV) fluids and the reduction of system efficiency due to metal particles in industrial liquids. Conventional optical and mechanical methods are often influenced by external factors such as fluid color, turbidity, or viscosity, and typically require complex installation and high costs, making the magnetic field-based approach more attractive. In the developed setup, planar PCB coils arranged in an “inner-serial” configuration are placed above and below the flow line to form an LC resonator that creates a stable magnetic tunnel field in the sensing region. The passage of a bubble or particle disturbs this field, causing a measurable shift in the resonance frequency. Frequency shifts are digitized using an LDC1612-based frequency-to-digital converter and processed by an STM32F103 microcontroller, then transmitted in real time to a local LCD and a remote C# based interface via an ESP32 Wi-Fi module. Experiments demonstrated that air bubbles as small as 1,76 mm<sup>3</sup> and metal particles as small as 0,095 mm<sup>3</sup> could be reliably detected at flow rates ranging from 19,6 to 47 mL/min. The high Q factor and low noise coil design significantly enhanced detection sensitivity. Throughout the development process, which culminated in a compact, Faraday-shielded final prototype produced via 3D printing, features such as automatic startup calibration and a moving average high-pass filter-based anomaly detection algorithm were implemented to improve system stability against environmental variability. The findings indicate that the proposed magnetic sensor offers a low-cost, easily integrable, and real-time monitoring solution for both IV treatment lines and industrial processes.

**Keywords:** Inductive Sensing, Air Bubble Detection, Magnetic Sensor, Metal Particle Detection, Medical Applications, Liquid Flow Sensor

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, medikal ve endüstriyel sıvı hatlarında hava kabarcığı ve metal partikül algılama amacıyla manyetik temelli bir sıvı akış sensörünün geliştirilmesi ve uygulanmasına yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın her aşamasında, bilimsel rehberliği, destekleyici yaklaşımı ve değerli katkıları ile yolumu aydınlatan danışmanım Doç. Dr. Abdülsamed TABAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecinde gerek teorik altyapının kurulmasında gerekse deneysel çalışmalarda yoğun katkı sunarak çalışmanın yönünü bilimsel anlamda güçlendiren ikinci danışmanım Doç. Dr. Emrehan YAVŞAN'a ayrıca şükranlarımı ifade etmek isterim.

Akademik sürecim boyunca rehberlikleri, yapıcı yönlendirmeleri, teknik katkıları ve kıymetli fikir paylaşımlarıyla çalışmanın gelişimine anlamlı katkılar sunan Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Rojhat KARA ve Arş. Gör. İbrahim AYDIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu süreç boyunca akademik ilham verici yaklaşımları ve değerli katkılarıyla her zaman yanımda olan sayın hocamız Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm bu süreç boyunca bana her zaman moral kaynağı olan, sabırla yanımda duran, duaları ve desteğiyle beni daima motive eden kıymetli annem ve babama; desteğini her zaman hissettiren ablam ve abime; bu zorlu süreçte yanımda olan ve sevgisiyle güç veren eşime sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında emeği geçen herkese en derin saygı ve minnet duygularımı sunarım.

Yasin ELHAN  
KONYA-2025

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ .....</b>	<b>xiii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi .....	1
1.2. Problem Tanımı .....	2
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI.....</b>	<b>4</b>
2.1. Hava Kabarcığı ve Metal Partikül Algılama Yöntemleri .....	4
2.1.1. Optik Yöntemle Algılama.....	4
2.1.2. Ultrasonik Yöntemler .....	6
2.1.3. Kapasitif Yöntemle Algılama .....	8
2.1.4. Endüktif Yöntemle Algılama.....	10
2.1.5. Termal Algılama Yöntemleri.....	11
2.1.6. Piezoelektrik ve Akustik Sensörler.....	12
2.1.7. Görüntüleme Tabanlı Yöntemler .....	12
2.2. Önerilen ve Literatürdeki Sistemlerin Karşılaştırmalı Analizi .....	13
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>14</b>
3.1. Önerilen Algılama Sistemi ve Sistem Bileşenleri.....	14
3.1.1. Algılama Prensibi .....	15
3.1.2. Düzlemsel Bobin (PCB Coil) Tasarımı .....	25
3.1.3. Mikrodenetleyici (MCU) ve Yazılım Altyapısı.....	32
3.2. Deneysel Kurulum .....	36
3.2.1. Laboratuvar Test Düzenegi.....	36
3.2.2. Kalibrasyon .....	49
3.3. LCR ile Bobin Performans Analizi.....	51
3.4. Önerilen Algılama Sisteminin Tasarımı .....	57
<b>4. SONUÇLAR, BULGULAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>60</b>
4.1. Sonuçlar .....	60
4.2. Bulgular .....	91

4.3. Öneriler .....	95
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>97</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Hava embolisi .....	2
2.1 Optik sensör .....	4
2.2 Optik sensör .....	5
2.3 Hava kabarcıklarının ultrasonik algılanması .....	7
2.4 Optik sensör .....	9
2.5 Optik sensör .....	10
3.1 Algılama sistemi blok diyagramı .....	14
3.2 Endüktif algılama yapısının genel modeli .....	16
3.3 Paralel LC Rezonatör ve Kazanç-Frekans İlişkisi .....	19
3.4 Rezonans frekansındaki değişim .....	20
3.5 Algılama Devresi .....	21
3.6 LDC1612'nin blok diyagramı .....	24
3.7 FDD ve MCU bağlantı yapısı .....	25
3.8 Manyetik algılama sisteminin genel yapısı .....	26
3.9 Bobin Geometrisi ve Parametreleri .....	27
3.10 Farklı düzlemsel PCB bobin tasarımları .....	28
3.11 LC devresi .....	28
3.12 Farklı düzlemsel PCB bobin tasarımları .....	29
3.13 LC devresi .....	30
3.14 Tasarlanan bobinlerin üretilmiş hali .....	30
3.15 LC devresi .....	31
3.16 Seçilen prototip PCB bobin yerleşimi .....	32
3.17 STM32 Mikrodenetleyici Aileleri .....	33
3.18 STM32F1 Mikrodenetleyici Ailesi .....	34
3.19 Manyetik algılama sistemimizin bağlantı şeması .....	35
3.20 Geliştirilen düzeneğin elektronik bağlantı gösterimi .....	35
3.21 Hasta İzleme ve Uyarı Sistemi Arayüzü .....	36
3.22 Sıvı akış pompası .....	37
3.23 Algılama sisteminin prototip düzeneği .....	38

3.24	Osiloskop ile kanal testi düzenek yapısı .....	40
3.25	Osiloskop ile yapılan devre testleri .....	40
3.26	FDD dönüştürücü devresine ait kanalların osiloskop ile ölçüm testleri .....	41
3.27	Osiloskop ile yapılan kanal testleri .....	41
3.28	Geliştirilen test ortamının 3B gösterimi .....	42
3.29	Geliştirilen test ortamında yapılan denemeler .....	43
3.30	Tasarlanan sistem .....	43
3.31	Geliştirilen test düzeneğinin gösterimi .....	44
3.32	Tasarlanan test ortamı .....	44
3.33	Farklı bobinlerde yapılan test görüntüleri .....	45
3.34	bobin üzerinden hava kabarcığı geçerken çekilmiş iki farklı görüntü .....	46
3.35	Nihai prototipin mekanik tasarımı .....	47
3.36	Prototipin bileşenlerinin gösterimi .....	47
3.37	Prototip Tasarımı 1 .....	48
3.38	Prototip Tasarım Görüntüleri .....	48
3.39	Sistem Algoritması .....	50
3.40	LCR metre ile test-1 .....	52
3.41	LCR metre ile test-2 .....	53
3.42	LCR metre çift bobin testi-1 .....	56
3.43	LCR metre çift bobin testi-2 .....	56
3.44	LCR metre çift bobin testi-3 .....	56
3.45	Önerilen sistemin nihai görüntüleri .....	58
3.46	Tasarlanan sistemin arayüz çalışması .....	58
4.1	Sensör veri grafikleri .....	61
4.2	Hava kabarcığı test grafiği 1 .....	62
4.3	Hava kabarcığı ölçüm sonuç grafiği .....	63
4.4	Hava kabarcığı geçişi sırasında oluşan grafik .....	63
4.5	Hava kabarcığı test grafiği 2 .....	64
4.6	Hava kabarcığı test grafiği 3 .....	65
4.7	Parçalı Elektrot Merkezli Bobin test grafiği 1 .....	66
4.8	Dairesel merkezli bobin ile test grafiği .....	66
4.9	Dairesel merkezli bobinin test grafiği .....	67

4.10 Sarmal merkezli coilin test grafiği .....	67
4.11 İ içe seri yapılı bobinin test grafiği .....	67
4.12 İ içe seri yapılı bobin ile test grafiği .....	68
4.13 Sarmal bobin ile Dairesel merkezli bobin test grafiği .....	69
4.14 Ters yönlü i içe ve i içe seri bobin karşılaştırması .....	69
4.15 Dairesel merkezli ve i içe ters yönlü bobin karşılaştırması .....	70
4.16 Dairesel merkezli ve i içe ters yönlü bobin karşılaştırması .....	71
4.17 Dairesel merkezli ve i içe seri bobin karşılaştırması .....	72
4.18 Dairesel merkezli ve i içe seri bobin karşılaştırması .....	73
4.19 İ içe seri bobin test sonucu .....	73
4.20 İ içe seri bobin testi .....	74
4.21 Dairesel bobin ve parçalı elektrot yapılı bobin karşılaştırması .....	74
4.22 Dairesel ve sarmal merkezli bobin karşılaştırması .....	75
4.23 Dairesel merkezli ve sarmal merkezli bobin karşılaştırması .....	75
4.24 İ içe seri bobin ve sarmal bobin karşılaştırması .....	76
4.25 Ters+i içe bobin ve iki i ie bobin karşılaştırması .....	76
4.26 Ters yönlü i içe bobin ile i içe bobin karşılaştırması (ikinci test) .....	77
4.27 Dairesel + i içe bobin ile iki i ie bobin karşılaştırması .....	78
4.28 Dairesel + i içe bobin ile iki i ie bobin karşılaştırması (ikinci test) .....	79
4.29 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-1 ....	79
4.30 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-2 ....	80
4.31 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-3 ....	81
4.32 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-4 ....	81
4.33 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-5 ....	82
4.34 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-6 ....	82
4.35 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-7 ....	83
4.36 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-8 ....	83
4.37 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-9 ....	84
4.38 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-10 ...	84
4.39 İki i ie seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-11 ...	85
4.40 İki i ie seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-1 .....	86

4.41 İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-2 .....	86
4.42 İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-3 .....	87
4.43 İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-4 .....	87
4.44 İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-5 .....	88
4.45 İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-6 .....	89
4.46 İki iç içe seri yapılı bobin ile Alüminyum partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-1 .....	89
4.47 İki iç içe seri yapılı bobin ile Alüminyum partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-2 .....	90
4.48 İki iç içe seri yapılı bobin ile Alüminyum partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-3 .....	90
4.49 İki iç içe seri yapılı bobin ile Kalay ve Kurşun alaşımının geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği .....	91
4.50 Kumpas ile hava hacminin yaklaşık boyutunu tespit etmek .....	92
4.51 Hortum içindeki hava hacmi boyutu .....	93
4.52 Algılanabilen metal partiküller .....	94
4.53 Hortum içindeki yabancı madde geçişi .....	94

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 FDD register tablosu .....	38
3.2 Farklı bobin geometrilerine ait LCR ölçüm sonuçları .....	53
4.1 Algılanabilen metal partikül ve hava kabarcığı boyutları .....	91

## SİMGELER VE KISALTMALAR

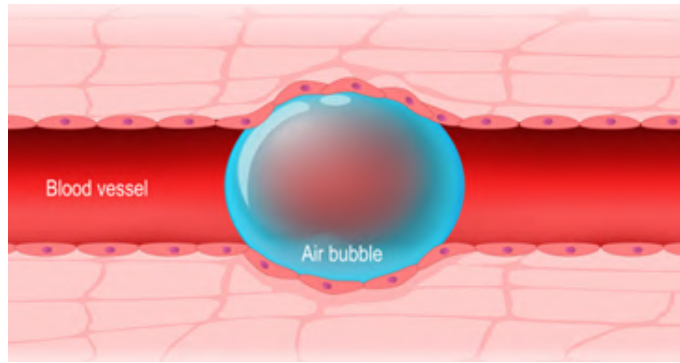
ADC	: Analog-Dijital Dönüştürücü
CPU	: Merkezi İşlem Birimi
SDS	: Sodyum Dodesil Sülfat
ESR	: Eşdeğer Seri Direnç
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
IR	: Kızılötesi
SPI	: Seri Çevresel Arayüz
SRF	: Kendi Rezonans Frekansı
RMS	: Ortalama Karekök
IV	: İntravenöz
LCR	: Endüktans-Kapasitans-Direnç Ölçer
LDC	: Endüktans-Dijital Çevirici
MCU	: Mikrodenetleyici Birimi
PCB	: Baskı Devre Kartı
FDD	: Frekans Dijital Dönüştürücü
I <sup>2</sup> C	: Entegre Devreler Arası
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
Q	: Kalite Faktörü
SDA	: Seri Veri Hattı
SCL	: Seri Saat Hattı
UART	: Asenkron Seri Haberleşme Arabirimi
USB	: Evrensel Seri Veri Yolu
DAC	: Dijital- Analog Dönüştürücü
LC	: Endüktans-Kapasitans

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmada, endüstriyel ya da medikal bir sıvı içindeki metal partiküllerin ve hava kabarcıklarının tespiti için manyetik algılama prensibiyle temassız olarak çalışan yüksek hassasiyetli bir sensör sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Gerek medikal gerekse endüstriyel uygulamalarda, iletilen sıvıların saflığını ve sürekliliğini sağlamak, sistem güvenliği ve insan sağlığı açısından yaşamsal öneme sahiptir. Şekil 1.1’de intravenöz (IV) sıvı uygulamalarında, damar yoluna karışabilecek küçük hava kabarcıkları gösterilmiştir. Bu küçük hava kabarcıkları, damar tıkanıklığına yol açarak ölümcül olabilen hava embolisi riskini doğurabilir (Landry, 2024). Sıvı ortamında oluşan bu tür anomalilerin erken evrede algılanması, hem süreç güvenliği hem de sistem sürekliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, geliştirilecek algılama sisteminin güvenilir, hızlı ve sıvıya temas etmeyen bir yapıda olması hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan elektromanyetik temelli sensör yaklaşımı, özellikle düşük hacimli anomalilerin dahi tespiti için uygun bir çözüm sunmaktadır. Tıbbi açıdan değerlendirildiğinde, hava kabarcıklarının damar sistemine girmesi sonucu oluşan hava embolisi, çoğu zaman ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu kabarcıklar kalp, akciğer ya da beyin gibi hayati organlara ulaştığında, kan akışını engelleyerek dokuya yeterli oksijenin ulaşmasını önler. Embolinin büyüklüğü ve hedef organın konumu, sonuçların ciddiyetini doğrudan belirlemektedir. Literatürde belirtildiği üzere, küçük çaplı kabarcıklar organizma tarafından tolere edilebilse de, büyük boyutlu emboliler birkaç dakika içinde dahi ölümle sonuçlanabilmektedir (McCarthy vd., 2016; Landry, 2024). Bu tür olaylar yalnızca damar yolu uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp; cerrahi işlemler, travmatik yaralanmalar ve dalış gibi özel durumlarda da oluşabilmektedir. Kabarcıkların dolaşım sisteminde tıkanıklığa yol açması, hipoksiye ve ciddi doku hasarına neden olabileceğinden, şüpheli durumlarda acil tıbbi müdahale hayati önem taşımaktadır.

Endüstriyel sıvılardaki metal parçacıkların tespiti, üretim güvenliği ve sistem sürekliliği için gereklidir. Üretim süreçlerinde kullanılan sıvılar içinde yer alan metalik partiküller, özellikle pompa, vana ve sensör gibi bileşenlerde aşınma ve tıkanma



**Şekil 1.1.** Kan damarındaki bir hava kabarcığı Landry (2024)

sorunlarına yol açabilir. Bu durum, ürün kalitesinin düşmesine ve bakım maliyetlerinin artmasına neden olabilir.

Bu nedenle, üretim süreçlerinde güvenilir ve doğru bir algılama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstriyel sıvılar içerisindeki metalik partiküllerin doğru bir şekilde algılanabilmesi, üretim süreçlerinde kaliteyi korumak ve bakım maliyetlerini azaltmak için önemlidir.

## 1.2. Problem Tanımı

Medikal alanda sıvı ilaç enjeksiyon uygulamaları, endüstriyel alanda yağlama veya hidrolik tahrik sistemleri gibi homojen akışın istendiği sıvı hatlarında olası hava boşlukları, hava kabarcıkları veya metal partiküller medikal ve endüstriyel uygulamalarda güvenlik ve kalite sorunlarına yol açabilmektedir. Özellikle intravenöz (IV) sıvı tedavi sistemlerinde meydana gelen hava kabarcıkları, damar içine girmeleri hâlinde hava embolisi gibi hayati riskler taşıyan komplikasyonlara neden olabilir. Bu durum, hasta güvenliğini doğrudan tehdit etmekte ve klinik süreçlerde sürekli gözetim gerektiren bir problem oluşturmaktadır.(Shalaldehy vd., 2012) Benzer şekilde, endüstriyel sıvı dolaşım sistemlerinde, sıvı içerisine karışan metal partiküller; pompa, valf, sensör ve motor gibi hassas ekipmanlarda aşınma, tıkanma ve erken arıza gibi ciddi sistemsel problemlere yol açmakta; bu da üretim verimliliğini düşürmekte ve bakım maliyetlerini artırmaktadır. Dolayısıyla homojen sıvı akışı içinde istenmeyen bu tip oluşumların sistem girişi öncesinde tespiti önemlidir. Bu alandaki tespit sistemlerinin çoğu optik veya mekanik prensiplere dayanmaktadır. Bu teknolojiler, sıvının fiziksel ve kimyasal özelliklerinden (örneğin renk, bulanıklık, viskozite, sıcaklık) etkilenmekte ve bu nedenle

farklı ortam koşullarında güvenilirliklerini kaybedebilmektedir. Ayrıca bu sistemlerin çoğu, pahalı donanımlar, karmaşık kurulum süreçleri ve sık bakım gereksinimleri nedeniyle hem maliyetli hem de sınırlı kullanım alanlarına sahiptir. Bu durum, özellikle mobil sağlık çözümleri ve düşük maliyetli endüstriyel uygulamalar için büyük bir engel oluşturmaktadır. Bu çerçevede ihtiyaç duyulan algılama sistemi; sıvı hattına temas etmeden, ortamdan bağımsız olarak güvenilir şekilde çalışabilen, düşük maliyetli, kolay entegre edilebilir ve gerçek zamanlı çalışabilecek bir algılama sistemidir. Bu yüksek lisans çalışmasında, düzlemsel bobin (planar coil) tabanlı, manyetik alan değişimlerinden kaynaklı frekans kaymalarını esas alan endüktif bir sensör sistemi tasarlanarak bu probleme çözüm sunulması amaçlanmaktadır. Geliştirilen sistemin hem medikal tedavi güvenliği hem de endüstriyel proses kalitesi açısından, mevcut sistemlere göre daha dayanıklı, ekonomik ve uygulanabilir bir alternatif ortaya koyması hedeflenmektedir.

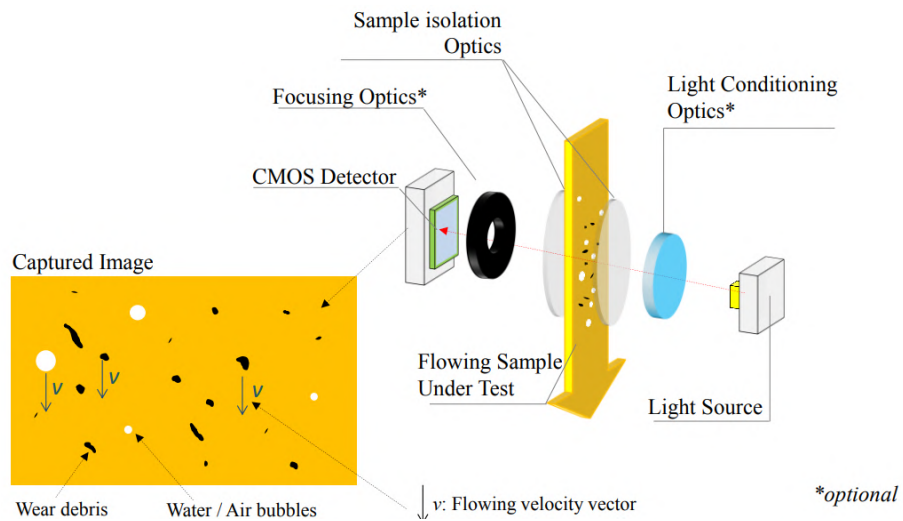
## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Hava Kabarcığı ve Metal Partikül Algılama Yöntemleri

Sıvılar içindeki hava kabarcıkları ve metal partiküllerin algılanması, hem tıbbi uygulamalarda (örneğin intravenöz infüzyon hatlarında hava embolilerinin önlenmesi) hem de endüstriyel proseslerde (örneğin akış hatlarında istenmeyen gaz boşlukları ve metal partikül tespiti) kritik öneme sahiptir. Bu nedenle literatürde optik, ultrasonik, kapasitif ve endüktif gibi farklı fiziksel prensiplere dayanan algılama yöntemleri geliştirilmiştir.

#### 2.1.1. Optik Yöntemle Algılama

Optik temelli sistemler, sıvı içerisindeki hava kabarcıklarını ve metal partikülleri, sıvının geçirgenliğindeki ani değişimleri ışık kaynağı ve alıcı arasındaki etkileşim üzerinden algılamaktadır. Bu yöntemler genellikle kızılötesi (IR) LED'ler ve fotodiyotlardan oluşan yapıdadır. Maliyet ve hassasiyet açısından etkili olmakla birlikte, uzun süreli kullanımda bileşenlerin ömrü kısa olmakta ve çevresel ışık kaynaklarından etkilenme riski bulunmaktadır. Optik sistemlerin kullanıldığı çalışmalarda, polimer optik fiber sensörler ile sıvı seviyesi ve parçacık varlığı tespiti gerçekleştirilmiştir (Mabe vd., 2017; Zhang vd., 2018, 2015).



Şekil 2.1. Mabe ve arkadaşlarının tasarlamış olduğu sensör gösterimi (Mabe vd., 2017)

Şekil 2.1’de Mabe ve arkadaşlarının tasarlamış olduğu hava kabarcığı sensörü şematize edilmiştir. Optik sensörler, sıvı içerisindeki hava kabarcığını ışık geçirgenliğindeki ani değişimi tespit ederek algılar. Genellikle bir tarafta kızılötesi (IR) LED veya lazer verici, karşı tarafta ise bir foto-alıcı (fotodiyot veya fototransistör) bulunur. Sıvı dolu iken ışık ışını tüp içerisinden karşı tarafa geçer; ancak bir kabarcık geldiğinde ışık demeti kırılır veya soğurur, böylece alıcıya ulaşan ışık şiddeti aniden düşer. Bu değişim belirli bir eşik değerinin altına inerse, sistem kabarcık algılandığına karar verir.



Şekil 2.2. U şeklinde tasarlanmış Optik sensör yapısı (EDN, 2024)

Optik yöntemler *non-invaziv* olup sıvı ile doğrudan temas etmeden çalışır ve elektriksel izolasyon problemleri oluşturmaz. Tasarımı görece basit ve maliyeti düşüktür; bu sebeple birçok medikal infüzyon cihazında kızılötesi (IR) sensörler yaygın biçimde kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de örnek bir optik sensör sistemi gösterilmektedir. Yüksek hassasiyetle çalışabilen bu sistemler, uygun tasarım koşullarında oldukça küçük kabarcıkları dahi algılayabilir. Aynı zamanda elektromanyetik parazite ve elektronik gürültülere karşı bağımsızlık göstermeleri önemli bir avantaj sağlar. Ancak bu sistemlerin temel kısıtlarından biri, algılama yapılacak sıvının ve boru malzemesinin optik olarak şeffaf ya da en azından yarı saydam olmasını gerektirmesidir. Bu nedenle koyu renkli, opak veya metalik tüplerde ya da sıvılarda kullanımları sınırlıdır.

Optik sensörlerin bir diğer sorunu, verici ve alıcı arasında zamanla birikebilecek tortuların ışık yolunu kısmen kapatarak kalibrasyonun bozulmasına ve yanlış alarmlara neden olmasıdır. Bu durum, literatürde *fouling* etkisi olarak bilinir ve sensör hassasiyetinin zamanla azalmasına yol açar. Ayrıca optik algılama sistemleri, belirli bir boru çapı ve duvar kalınlığı için optimize edilmek zorundadır. Farklı tüp çaplarında sensör kör bölgeler

oluşturabilir.

Dış ortam ışığı da tasarım yeterli değilse optik algılamaya girişim yapabilir. Bu tür girişimler genellikle IR ışığın modülasyonu ve optik filtreleme ile engellenmeye çalışılsa da, sistem tasarımında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Öte yandan, eğer optik sistem invaziv olarak yani sıvı içerisine daldırılan bir fiber optik prob gibi tasarlanacaksa, bu durumda sterilizasyon ve korozyon problemleri ortaya çıkabilir. Bu nedenle pratik uygulamalarda optik algılama çoğunlukla non-invaziv gerçekleştirilir.

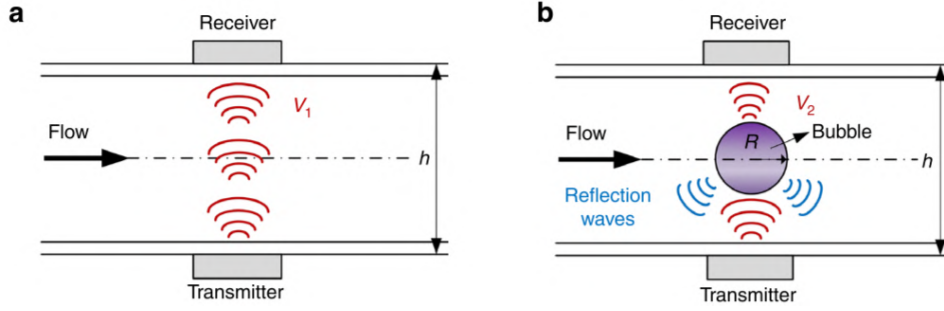
Şeffaf proses borularında veya mikroakışkan çip kanallarında kabarcık takibi amacıyla kamera tabanlı ya da LED-fotodiyot çiftleri gibi optik sensör temelli sistemler kullanılabilir. Ancak endüstriyel ortamlarda sıvılar her zaman optik olarak temiz olmayabileceği için, bu yöntem sadece gıda endüstrisi, farmasötik üretim gibi şeffaf proseslerde ve içme suyu arıtma gibi alanlarda kullanıma uygundur. Buna karşın; petrol türevleri, bulanık kimyasal karışımlar veya atık su gibi opak sıvılar için uygulanabilirliği yoktur. Ayrıca optik sistemlerde sıcaklık değişimlerinin LED veriminde azalmaya ya da alıcı devrelerin kararlılığında bozulmalara neden olabileceği bilinmektedir. Bu tür etkiler genellikle uygun elektronik kompanzasyon devreleri ile en aza indirilir.

### 2.1.2. Ultrasonik Yöntemler

Ultrasonik yöntemler, sıvı içerisindeki farklı fazların ses iletim hızlarındaki değişiklikler üzerinden hava kabarcıklarını ve metal partiküllerin algılanmasını hedeflemektedir. Ultrasonik verici ve alıcı elemanlar arasındaki geçiş süresi, zayıflama ya da yansıma farkları algılama kriteri olarak kullanılır. Bu teknoloji ilk olarak 1970'li yıllarda önerilmiş olup, literatürde örnekleri azalmış durumdadır (Namery, 1976; Kamen, 1991).

Ultrasonik sistemler çoğunlukla yüksek doğruluk sunsa da, karmaşık yapıları, yüksek maliyetleri ve yüksek enerji gereksinimleri sebebiyle taşınabilir sistemler için tercih edilmemektedir.

Ultrasonik yöntemler, ses dalgalarının sıvı ve gaz ortamlardaki yayılım farklarına dayanır. Bu yöntemde genellikle iki piezoelektrik kristal transdüser, ölçüm bölgesinin karşılıklı iki tarafına yerleştirilir. Bunlardan biri ultrasonik frekansta titreştirilerek ses dalgalarını sıvıya gönderirken, diğeri bu dalgaları karşı taraftan alır. Sıvılar, ses dalgalarını



**Şekil 2.3.** Hava kabarcıklarının ultrasonik algılanması a) Ultrasonik verici ve alıcı arasında hava kabarcığı bulunmadığında ses dalgaları doğrudan iletilir ve belirli bir genlikte alınır. b) Hava kabarcığı mevcut olduğunda ses dalgaları kabarcıktan yansır, genlik azalır ve yansıma dalgaları oluşur. Bu farklılıklar algılanarak hava kabarcığı tespiti yapılır (Yuan vd., 2023).

havaya kıyasla çok daha etkin iletebilirken; hava, düşük akustik empedansı nedeniyle bu dalgaları neredeyse tamamen yansıtır. Bu nedenle sıvı ortamda kabarcık bulunmadığında güçlü bir sinyal alıcıya ulaşır. Ancak bir hava kabarcığı araya girdiğinde, ses dalgaları kabarcık yüzeyinden yansıyarak alıcıya ulaşmaz ve sinyal şiddeti keskin biçimde azalır. Bu ani düşüş algılanarak kabarcık varlığı tespit edilir (Yuan vd., 2023).

Ultrasonik algılamada kullanılan frekanslar genellikle 20 kHz üzerinde olup, medikal uygulamalarda çoğunlukla 100 kHz ile 1 MHz aralığında çalışır. Gönderilen dalganın genliği veya iletim kaybı izlenebildiği gibi, bazı sistemlerde iletim süresi (*transit-time*) veya Doppler kayması da hava kabarcığı tespiti amacıyla kullanılabilir. Ancak en yaygın yaklaşım, sinyalin zayıflamasına (*attenuation*) dayalı akustik gölgeleme yöntemidir. Hava kabarcığı, ultrasonik dalgalar açısından adeta bir ayna gibi davranarak arkaya ses geçişini engeller. Bu temel fiziksel özellik, ultrasonik sistemlerin yüksek hassasiyetini sağlayan başlıca etkindir.

Optik yöntemlerde olduğu gibi, ultrasonik sistemler de *non-invasiv* olup sıvıyla doğrudan temas etmeden, boru dışından ölçüm yapabilir. En büyük avantajı, ortamın optik şeffaflığına ihtiyaç duymamasıdır. Yani sıvı veya boru opak olsa dahi, ultrasonik dalgalar çoğu malzemeden geçerek ölçüm yapılmasına olanak tanır. Bu da yöntemi özellikle viskoz, renkli veya bulanık sıvılar için uygun hale getirir.

Bununla birlikte, ultrasonik sistemler oldukça pahalı sistemlerdir. Piezoelektrik transdüserler ve bunları sürmek için gereken elektronik devreler, optik sistemlere kıyasla daha pahalıdır. Bu nedenle günlük medikal uygulamalarda genellikle IR tabanlı optik sensörler tercih edilirken, ultrasonik sistemler daha kritik uygulamalarda kullanılır.

Transdüserlerin hortuma temas yüzeyinin uygunluğu da kritik bir parametredir. Arada çok küçük bir hava boşluğu bile kalması durumunda, sistem kabarcık varmış gibi yanlış alarm verebilir. Bu da montaj sürecinde yüksek hassasiyet gerektirir. Literatürde, hortum yüzeyindeki nem damlalarının dahi yanlış tetiklemelere neden olabileceği ve bu nedenle alarm eşiklerinin dikkatle ayarlanması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, sistem hassasiyeti çok yüksekse, klinik olarak önemsiz boyuttaki kabarcıklar bile yanlış alarm oluşturabilir. Bu da *false alarm* oranını artırarak klinik personelin yükünü yükseltebilir.

Enerji tüketimi açısından da bazı handikaplar bulunmaktadır. Tipik bir ultrasonik verici, sürekli çalışmada yaklaşık 100 mW seviyesinde güç tüketebilir. Bu durum, batarya ile çalışan taşınabilir cihazlar için dezavantaj oluşturur. Ayrıca piezoelektrik transdüserlerin sürülmesi için gerekli olan yükselteçler ve yüksek frekanslı algılama katları, sistemin elektronik karmaşıklığını artırmaktadır. Son olarak, sesin yayılma hızı sıcaklıkla değiştiği için, ultrasonik sistemlerin hassas uygulamalarda sıcaklık kompanzasyonu ile kalibre edilmesi gerekebilir. Ortam sıcaklığı değişimleri, ölçüm hatalarına neden olabileceğinden, bu faktör tasarımda mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

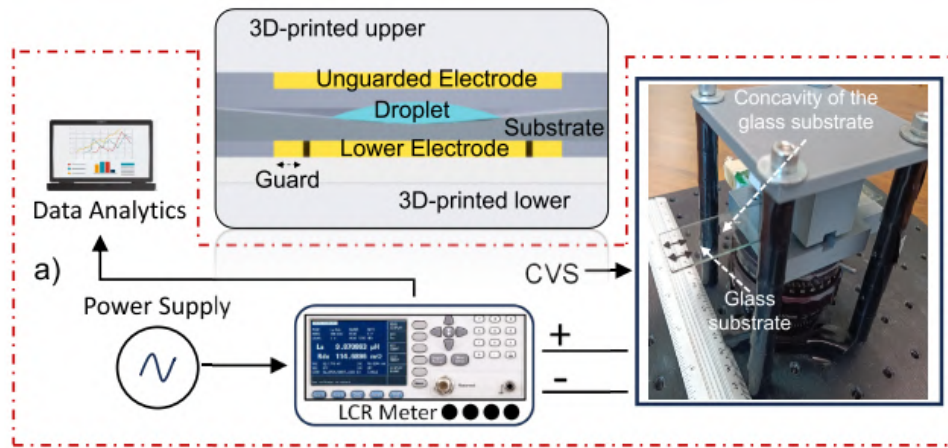
### 2.1.3. Kapasitif Yöntemle Algılama

Kapasitif sensör teknolojisi, sıvı ve gaz fazları arasındaki dielektrik farkını temel olarak hava kabarcığı ve partikülleri algılamaktadır. Bu yöntemde, sıvının taşındığı tüpün dışına yerleştirilen elektrotlar vasıtasıyla sıvı içerisindeki partiküllerin ya da havanın dielektrik farkından dolayı algılama sağlanır. Elektrotlar arasında oluşan elektrik alan, sıvının dielektrik sabiti ile doğrudan ilişkilidir. Sıvı içerisinden geçen hava kabarcığı, bu sabitte ani bir düşüşe neden olur ve bu durum, kapasitans değerinde ölçülebilir bir azalma olarak kendini gösterir. Böylece, sıvı iletiminin sürekliliği bu temassız yöntemle izlenebilir hale gelir (Quoc vd., 2014, 2015).

Bu temel prensibe dayanarak Vu ve arkadaşları, baskılı devre kartı (PCB) üzerine yerleştirilmiş kapasitif bir sensör yapısı ile sıvı ortamındaki hava boşluklarını başarıyla tespit etmiş; sistemin hem duyarlılık hem de entegrasyon açısından IV hatlarına uygun olduğunu göstermiştir (Quoc vd., 2014). Benzer şekilde Salmaz ve arkadaşları, kapasitif ölçüm sistemi kullanarak intravenöz (IV) sıvılarında damlacık sayımı gerçekleştirmiştir (Salmaz vd., 2021). Bu çalışmalar, kapasitif yöntemlerin hem kabarcık tespiti hem de akış

parametrelerinin takibi açısından çok yönlü kullanılabilceğini ortaya koymuştur.

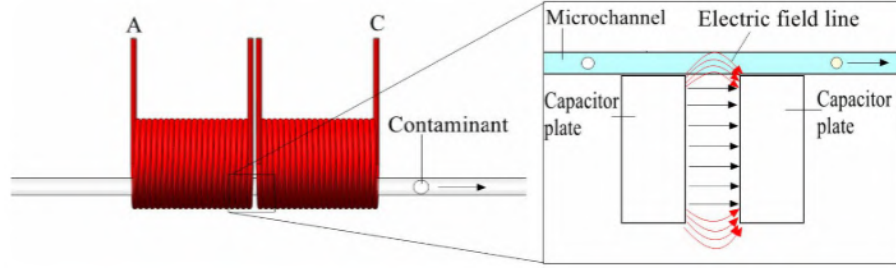
Bununla birlikte, kapasitif ölçüm prensibi sadece fiziksel hacim değişiklikleriyle sınırlı kalmayıp, sıvının kimyasal bileşimiyle ilgili değişiklikleri de tespit edebilecek biçimde geliştirilebilmektedir. Uc-Martín ve Ramírez-Chavarría tarafından geliştirilen değişken kapasitans ölçüm sistemi (VCMS – Variable Capacitance Measurement System) Şekil 2.4’de gösterilmektedir. Önerilen bu yöntem, iyonik özellik gösteren sodyum dodesil sülfat (SDS) gibi maddelerin saf sıvılar içerisindeki varlığını, ortamın dielektrik sabitinde oluşturduğu değişiklik aracılığıyla başarıyla algılamaktadır (Uc-Martín ve Ramírez-Chavarría, 2023). Bu sistem, yüksek hassasiyetli kapasitif sensörlerle çözeltinin dielektrik özelliklerini sürekli izleyebilmekte ve yalnızca hacimsel değil, aynı zamanda içerik değişimlerine de duyarlılık sağlayarak kabarcık tespitinde uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu sayede, medikal ve endüstriyel uygulamalar için düşük maliyetli ve entegre edilebilir bir çözüm sunma potansiyeli taşımaktadır.



Şekil 2.4. VCMS sisteminin gösterimi(Uc-Martín ve Ramírez-Chavarría, 2023)

Bai ve arkadaşları (2020), manyetik nanoparçacık malzeme kullanarak indüktif-kapasitif çift modlu bir yağ algılama sensörü geliştirmiştir. Bu tasarlanan sistemin gösterimi Şekil 2.5’de verilmiştir. Bu sensör, mikroakışkan bir çip üzerinde tasarlanmış olup, hem indüktans hem de kapasitans ölçümleri yapabilmektedir. Sensörün içinde bulunan solenoid bobin, manyetik nanoparçacıklarla doldurularak, algılama hassasiyeti artırılmıştır. Bu yapı sayesinde, geleneksel tek bobinli sensörlere kıyasla, algılama doğruluğu %19–24 oranında iyileştirilmiştir. Ayrıca, sensör 20  $\mu\text{m}$  demir parçacıkları ve 80  $\mu\text{m}$  bakır parçacıklarını tespit edebilmekte, kapasitif modda ise 100–110  $\mu\text{m}$  su damlacıkları ve 150–160  $\mu\text{m}$  hava kabarcıklarını algılayabilmektedir. Bu

tasarım, yağ sistemlerinin içerisindeki partikül tespiti için yeni bir yöntem sunmakta ve sistemlerin ömrü ile sağlık durumunun izlenmesi açısından önem taşımaktadır.



**Şekil 2.5.** İki bobinli algılama sistem yapısı (Bai vd., 2020)

Kapasitif sistemlerin avantajı, sensör yapısının ucuz ve kolay üretilebilir olmasıdır. Ancak literatürde, bu yapıların sıcaklık değişimlerine, elektromanyetik gürültülere ve artefaktlara karşı duyarlı olduğu belirtilmiştir. Shi ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada da, sıvı içerisindeki hava kabarcığı tespiti kapasitif yöntemle başarılı olurken, sıcaklık ve nem gibi dış etkenlerin ölçüm doğruluğu üzerinde olumsuz etkiler yarattığı bildirilmiştir (Shi vd., 2019).

Kapasitif yöntemin bir varyasyonu da iletkenlik temelli ölçümlerdir. Eğer sıvı elektriksel olarak iletken ise (örneğin tuzlu su, kan), sıvıya doğrudan temas eden elektrotlarla bir direnç ölçümü yapılabilir. Bu invaziv yaklaşımda elektrotlar sıvıya batırılır ve aralarındaki iletkenlik sürekli izlenir; kabarcık geldiğinde devre açılmış gibi davranır (direnç ani artar). Fakat medikal uygulamalarda doğrudan sıvıya elektrot sokmak hasta güvenliği açısından riskli olduğundan bu yöntem pek tercih edilmez.

#### 2.1.4. Endüktif Yöntemle Algılama

Endüktif yöntemlerde, bobinlerin manyetik alan içerisindeki endüktans değerinin değişimi esas alınmaktadır. Sıvı içinden geçen metal partiküller ya da hava kabarcıkları, bobinin elektromanyetik alanına etki ederek rezonans frekansında kaymalara neden olur. Bu kaymalar, manyetik algılamanın temelini oluşturur. Lebile ve arkadaşlarının çalışmasında, paralel yerleştirilmiş iki düzlemsel PCB bobin ile hidrolik yağ içerisinde demir ve bakır partikülleri başarıyla tespit edilmiştir (Ilerioluwa vd., 2022).

Endüktif sistemler iletken sıvılarıyla yüksek hassasiyette çalışabilmeleri, elektromanyetik parazitlere karşı dirençli olmaları ve kontakt gerektirmeyen yapılarıyla

sıvıdan izole ölçüm sağlayabilmeleri açısından avantajlıdır. Ancak doğru bobin tasarımı ve rezonans devresi yapılandırması, sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Endüktif algılama prensipleri, sıvının elektromanyetik özelliklerindeki farklılıklardan yararlanır. Bu yöntemin temelinde girdap akımı (*Eddy current*) prensibi yer alır. Alternatif akımla sürülen bir bobin, çevresinde değişken bir manyetik alan oluşturur. Bu alan iletken sıvının içinden geçtiğinde, sıvıda Lenz kanunu gereği zıt yönde girdap akımları indüklenir ve bu da bobinin empedansını artırır. Ancak sıvı yerine hava bulunduğunda (hava neredeyse iletken olmadığından) bu akımlar oluşmaz ve bobinin empedansı azalır. Bu fark, algılama amacıyla kullanılır. Genellikle bir *LC rezonans devresi* kullanılır ve rezonans frekansı şu formülle ifade edilir:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.1)$$

Burada  $L$  bobinin endüktansı,  $C$  ise kondansatör değeridir. Hava kabarcığı bobin alanına girdiğinde  $L$  değeri artar ve dolayısıyla rezonans frekansı  $f_0$  azalır. Frekanstaki bu değişim, ya doğrudan ölçülerek ya da empedans genliğindeki sapmalar üzerinden yorumlanarak kabarcık tespiti gerçekleştirilir (Yavsan, 2024).

### 2.1.5. Termal Algılama Yöntemleri

Termal yöntemlerde hava kabarcığı tespiti, sıvı ve gaz fazlarının ısı iletkenliği ve termal kapasite farklılıklarına dayanır. Genel olarak sıvılar, gazlara kıyasla ısıyı daha etkin iletir ve taşır; ayrıca daha yüksek termal kütleyle sahiptir. Bu prensiple çalışan bir sistemde, küçük bir ısıtıcı elemanın çevresine yerleştirilmiş sıcaklık sensörleri yardımıyla, ısı dağılımı izlenir. Normal sıvı akışı sırasında, ısı akışla birlikte taşınarak kararlı bir sıcaklık profili oluşur. Ancak sistemden hava kabarcığı geçtiğinde, gazın düşük termal iletkenliği nedeniyle ısı dağılımı bozulur ve bu değişim, sıcaklık sensörleri tarafından anomali olarak algılanır.

Bu yöntemin güncel bir örneği, Kore Makine ve Malzeme Enstitüsü (KIMM) tarafından geliştirilen kalorimetrik mikro akış sensörüdür. Söz konusu sensör, silikon bir intravenöz (IV) tüp üzerine dıştan entegre edilen üç sıcaklık sensörü ile 0.1 mL/saat gibi düşük akış hızlarında hem debi takibi hem de hava kabarcığı algılamasını gerçekleştirebilmektedir. Termal sensörlerin yüksek hassasiyetle hem akışı hem de kabarcıkları izleyebilmesi, sensör elemanlarının sıvıya temas etmeden

konumlandırılabilmesi (non-invazivlik) uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca bu sistemler uzun süreli kullanıma uygundur. Ancak termal sensörlerin tepki süresi, optik veya ultrasonik yöntemlere göre daha yavaş olabilir; çünkü ısı dengeye ulaşma süresi birkaç yüz milisaniyeyi bulabilir. Ortam sıcaklığındaki dalgalanmalar da ölçüm hassasiyetini etkileyebileceğinden, özellikle endüstriyel ortamlarda sıcaklık kompanzasyonunun sağlanması gerekebilir. Ayrıca bu yöntem, sabit debi varsayımı ile çalıştığından, değişken akış hızlarına sahip sistemlerde kabarcık etkisini debi etkisinden ayırmak için daha karmaşık algoritmaların kullanılmasını zorunlu kılar.

### **2.1.6. Piezoelektrik ve Akustik Sensörler**

Piezoelektrik malzemeler yalnızca ultrasonik verici veya alıcı olarak değil, aynı zamanda titreşim sensörü ya da basınç darbesi dedektörü olarak da kullanılabilir. Örneğin bir boru hattına yapıştırılan piezoelektrik film (örneğin PVDF) ya da kuartz tabanlı bir sensör, akış sırasında oluşan türbülans ya da kabarcıklardan kaynaklanan mekanik titreşimleri algılayabilir. Bu titreşimler, özellikle bir hava kabarcığı pompa çarkından ya da dar bir vana açıklığından geçerken oluşan kısa süreli akustik darbelerle ortaya çıkar ve bu sinyaller boru duvarı boyunca iletilerek piezoelektrik sensör yardımıyla tespit edilebilir.

Bu yöntem, yüksek basınçlı boru hatları gibi (örneğin hidrolik sistemlerde) uygulamalarda, kabarcıkların akustik imzasına dayalı olarak algılanmasında kullanılmaktadır. Piezoelektrik sensörler sistemin dış yüzeyine kolaylıkla monte edilebilmesi ve aktif sürücü devresine ihtiyaç duymadan (pasif olarak) algılama yapabilmektedir. Bu sistemlerdeki sinyalin zayıf olması ve ortam gürültüsüne karşı hassasiyeti ölçüm doğruluğunu etkilemektedir. Yalnızca büyük hacimli kabarcıklar veya birden fazla kabarcığın oluşturduğu akustik gürültü algılanabilir düzeydedir.

### **2.1.7. Görüntüleme Tabanlı Yöntemler**

Görüntüleme tabanlı yöntemler, özellikle araştırma ve geliştirme ortamlarında hava kabarcıklarının doğrudan gözlemlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde yüksek hızlı kameralar veya endüstriyel görüntüleme sistemleri yardımıyla, akışkan içerisindeki kabarcıklar tespit edilebilir. Saydam borulardan geçen sıvı akışı kamerayla izlenerek, görüntü işleme teknikleriyle kabarcıkların sayısı, boyutu, konumu

ve hatta hızları hesaplanabilmektedir. Bu yaklaşım, diğer sensör teknolojilerinin algılayamadığı mikroskobik boyuttaki kabarcıkların çap dağılımının belirlenmesinde ve iki-fazlı akışlardaki gaz oranlarının ölçümünde faydalı olmaktadır.

Görüntüleme tabanlı sistemler, görsel verileri kaydederek detaylı analiz yapma imkânı sunar. Bu yöntem sayesinde kabarcıkların geometrik özellikleri, hareket yönleri ve zaman içindeki değişimleri gibi bilgiler elde edilebilir. Ancak, bu sistemlerin sürekli endüstriyel izleme uygulamalarında kullanımı bazı sınırlılıklar içermektedir. Kamera tabanlı sistemler genellikle yüksek maliyetli olup, büyük miktarda veri üretir. Ayrıca, ışık değişimleri ve boru kirliliği gibi çevresel etkenlere karşı hassastır. Görüntü işleme algoritmalarının yüksek hesaplama gücü gerektirmesi nedeniyle, gerçek zamanlı analizlerde gecikmelere yol açabilmektedir.

Bu nedenlerle görüntüleme tabanlı kabarcık algılama yöntemleri çoğunlukla kalibrasyon süreçlerinde veya laboratuvar ortamlarında doğrulama aracı olarak kullanılmakta, endüstriyel uygulamalarda ise nadiren tercih edilmektedir. Gerçek zamanlı ve düşük maliyetli izleme gerektiren sistemlerde optik, kapasitif veya endüktif gibi alternatif yöntemler daha uygun çözümler sunmaktadır.

## 2.2. Önerilen ve Literatürdeki Sistemlerin Karşılaştırmalı Analizi

Önerilen sistem, özgün bir geometri ve yerleşime sahip düzlemsel bobinler içermektedir. Özgün düzlemsel bobin tasarımı ile desteklenen endüktif algılama yaklaşımı sayesinde, hem hava kabarcığı hem de metal partikül tespiti temas gerektirmeden gerçekleştirilebilmiştir. Sistemin kabarcık boyutuna bağlı olarak farklı frekanslarda verdiği tepkiler, yüksek hassasiyetle ölçülmüş ve eş zamanlı olarak kablosuz veri aktarımı sağlanmıştır.

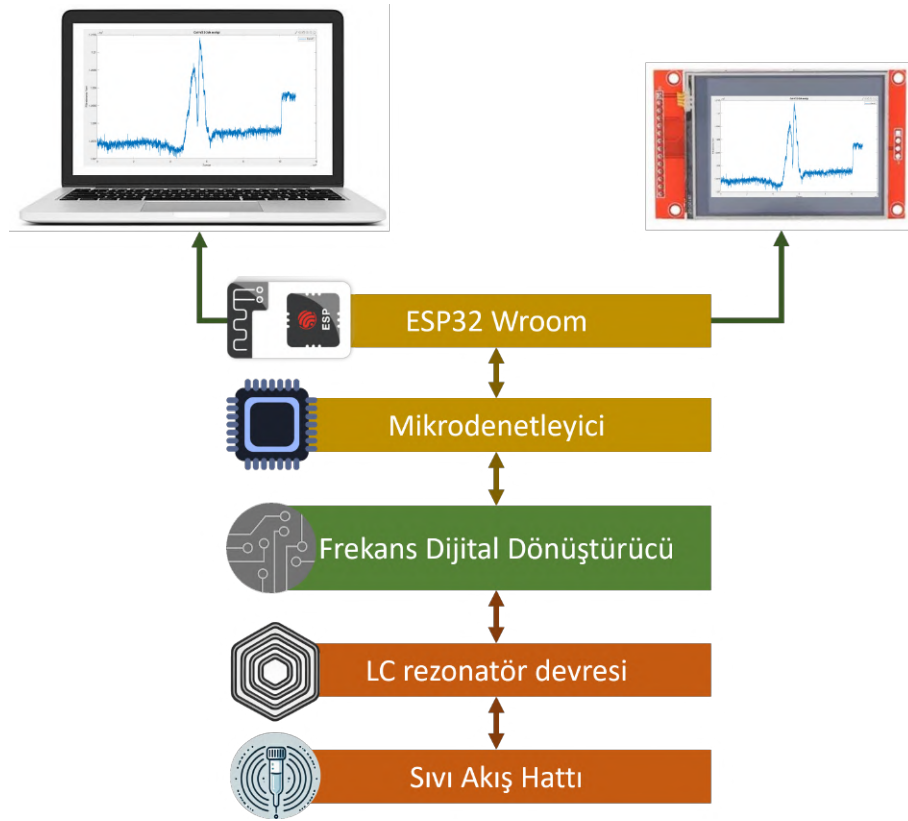
Diğer çalışmalarda çoğunlukla kapasitif yöntemlerle sınırlı kalan ve sıcaklık gibi çevresel değişkenlere karşı daha az dayanıklı yapılar tercih edilmiştir (Quoc vd., 2014; Shi vd., 2019; Salmaz vd., 2021; AYDOĞDU vd., 2019). Bu tez çalışmasında önerilen sistem ise elektromanyetik parazitlere karşı aktif ve pasif koruma yöntemleri ile donatılmış, manyetik alana dayalı ölçüm sayesinde sıvının optik veya iletkenlik özelliklerinden etkilenmeyen bir yapı ortaya konmuştur. Yüksek tekrarlanabilirlik, düşük maliyet, taşınabilirlik ve gerçek zamanlı analiz olanaklarıyla literatürde öne çıkan yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Önerilen Algılama Sistemi ve Sistem Bileşenleri

Bu çalışmada, medikal ve endüstriyel sıvılardaki hava kabarcıklarını ve metal partikülleri tespit etmek için düzlemsel bobin ve bu düzlemsel bobinden oluşan LC rezonatör devresi, medikal ve endüstriyel sıvıların geçtiği sıvı akış hattı, manyetik alan değişiminden kaynaklanan frekans kaymalarını dijital sinyallere çeviren frekans dijital dönüştürücü, gerçek zamanlı analiz ve sistem yönetimini sağlamak için mikrodenetleyici ve veri aktarımını sağlamak için ESP modülünden oluşan bir algılama sistemi önerilmiştir.

Şekil 3.1’de yer alan blok diyagramı sistem elemanlarının birbiriyle bağlantısını göstermektedir.



Şekil 3.1. Manyetik algılama sistemine ait temel bileşenlerin blok diyagramı

Endüktans ve kapasitans değişimlerini algılamak için birçok yöntem

bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında gerilim tabanlı ölçüm, akım tabanlı ölçüm, faz kayması ölçümü ve zaman tabanlı ölçüm gibi teknikler yer almaktadır. Bu çalışmada frekans tabanlı ölçüm yöntemi seçilmiştir. Frekans tabanlı ölçüm, özellikle LC rezonatör devrelerinde endüktans veya kapasitans değişimlerinin rezonans frekansında meydana getirdiği kaymaları algılayarak yüksek hassasiyet sağlamaktadır. Bu yöntem, çevresel etkilere karşı daha dayanıklı olup, dijital sistemlerle kolayca entegre edilebilmektedir.

Bu çalışmada, düzlemsel bir bobin ve bu bobinle oluşturulan bir LC rezonatör devresi kullanılarak sıvı akış hattından geçen hava kabarcıkları veya metal partiküllerin varlığı algılanmaktadır.

IV sıvısı içindeki hava kabarcıkları ve endüstriyel sıvıdaki metal partiküller, düzlemsel bobinin manyetik alanını etkileyerek LC devresinin rezonans frekansında kaymalara neden olmaktadır. Bu çalışmada, belirtilen frekans kaymalarının ya da değişimlerinin dijital verilere dönüştürülmesi için bir dönüştürücü entegresi kullanılmıştır. Bu entegre, endüktans-dijital dönüştürücü (LDC) olarak adlandırılmaktadır. Fakat buradaki endüktans değişimi, LC devresinin rezonans frekansı üzerinden elde edildiğinden sunulan tez çalışmasında bu dönüştürücü entegresi; Frekans Dijital Dönüştürücü (FDD) olarak adlandırılmıştır. FDD, endüktans değişiminden kaynaklanan frekans kaymalarını anlık olarak dijital sinyallere çevirerek mikrodenetleyiciye aktarır. Bu sayede, sistem hava kabarcığı ve metal partikül tespiti yaparken yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlamaktadır.

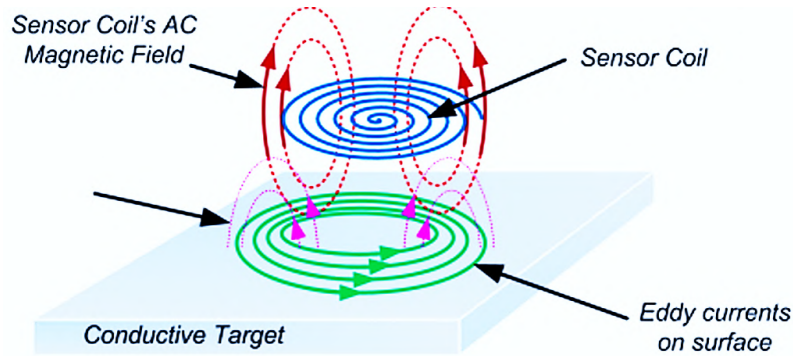
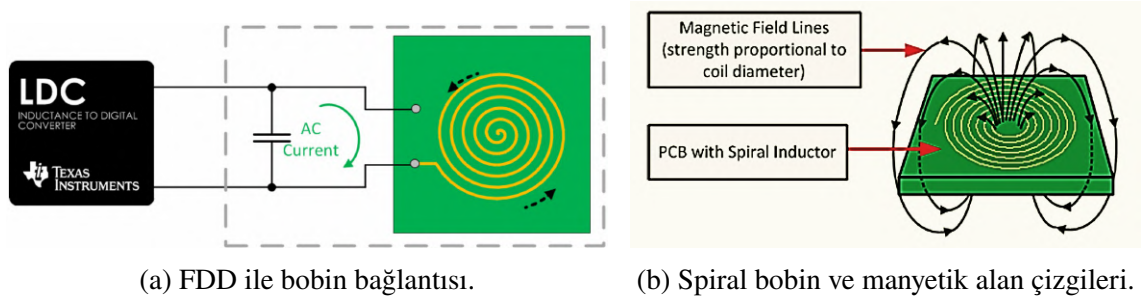
### **3.1.1. Algılama Prensibi**

Girdap akımları (Eddy current), değişken manyetik alanların etkisiyle iletken malzemelerde dolaşan kapalı döngüler oluşturan akımlardır. Bu akımlar, test bobini tarafından üretilen alternatif manyetik alanın malzeme içinde oluşturduğu elektromanyetik indüksiyon sonucu meydana gelir. Eddy akımı prensibi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada, endüstriyel ve medikal sıvıların (standart IV serum sıvısı) kesintisiz ve homojen akışını bozan, istenmeyen metal partikül ve hava kabarcıklarının algılanması için eddy akımı prensibi benimsenmiştir. Medikal uygulamalarda, intravenöz (IV) sıvılardaki hava kabarcıkları emboli veya çeşitli deri altı komplikasyonlarına neden olabilirken, endüstriyel sıvılar içindeki metal partiküller, sistem bileşenlerinde aşınma ve

tıkanıklık gibi problemlere neden olmaktadır.

Bu çalışmada, manyetik alan değişimlerine duyarlı bir endüktif algılama sistemi geliştirilmiş ve bu yöntemle sıvı içerisindeki yabancı maddelerin algılanması amaçlanmıştır.



**Şekil 3.2.** Endüktif algılamada kullanılan FDD devresi, spiral bobin tasarımı ve yüzeyde oluşan Eddy akımları (Instruments, 2016).

LC sensöründen gelen AC manyetik alan, iletkenin yüzeyinde Eddy akımı oluşmasına neden olur. Eddy akımı, endüktif sensörün endüktansını etkili bir şekilde azaltan karşıt bir manyetik alan oluşturur. Endüktans, mesafenin bir fonksiyonu olarak değişir.

Eddy akımı oluşumu için alternatif akım kaynağına bağlı bir test bobini kullanılır. Bobinden geçen akım, zamanla değişen bir manyetik alan oluşturarak test edilen iletken malzemenin yüzeyinde döngüsel akımların indüklenmesine neden olur. İndüklenen akımların büyüklüğü ve dağılımı, malzemenin elektriksel iletkenliğine bağlıdır. Yüksek iletkenlik değerine sahip malzemelerde daha güçlü eddy akımı oluşurken, düşük iletkenlik değerine sahip malzemelerde bu akımlar daha zayıf gerçekleşir.

Faraday'ın İndüksiyon Yasasına göre, manyetik akının zamanla değişimi sonucu

oluşan indüklenmiş gerilim, Denklem 3.3'de gösterildiği gibi ifade edilir (Cecco vd., 1981).

$$V_s = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

Denklem 3.3, manyetik akı değişiminin, bobin içinde bir gerilim oluşturduğunu gösterir. Bobin akımı sinüzoidal olarak değiştiği için, manyetik akı da aynı şekilde sinüzoidal formda değişir ve Denklem 3.3 ile ifade edilir (Cecco vd., 1981).

$$\phi(t) = \phi_0 \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

$$V_s = -N_p \omega \phi_0 \cos(\omega t) \quad (3.3)$$

Denklem 3.2'de,  $\phi_0$  manyetik akının tepe değeri,  $\omega$  açısal frekans ve  $t$  zamanı ifade eder. Manyetik akı değişimi nedeniyle malzeme içinde oluşan eddy akımı ise Ohm Kanununa göre şu şekilde ifade edilir (Cecco vd., 1981).

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'de  $Z_s$  test numunesinin empedansını ifade eder ve malzemenin elektriksel özelliklerine bağlıdır. Eddy akımları, malzeme içinde yüzeyden derine doğru sönümlenerek yayılır. Bu yayılım cilt etkisi (*skin effect*) olarak adlandırılır ve eddy akımlarının malzeme içindeki nüfuz derinliği Denklem 3.5 ile belirlenir (Cecco vd., 1981).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'da  $\delta$  nüfuz derinliği,  $f$  frekans,  $\mu$  manyetik geçirgenlik ve  $\sigma$  elektrik iletkenliğidir. Denklem 3.5'de görüldüğü gibi, frekans arttıkça eddy akımları yüzeye daha yakın bir bölgede yoğunlaşır, frekans düştüğünde ise daha derinlere nüfuz edebilir. Bu özellik, sistemin hangi frekansta çalışacağına karar verirken belirleyici bir parametredir. Örneğin, yüzeyde oluşan hava kabarcıkları veya metal partikülleri algılamak için yüksek frekanslar tercih edilirken, sıvı içindeki daha derin bölgelerdeki partikülleri algılamak için düşük frekans kullanılması gerekmektedir (Cecco vd., 1981).

Eddy akımı, malzeme içinde hareket ederken, malzemenin manyetik ve elektriksel özelliklerine bağlı olarak bir enerji kaybına neden olur. Lenz Kanunu'na göre, indüklenen

akımlar kendisini oluşturan manyetik alan değişimine karşı bir manyetik alan oluşturarak tepki verir. Denklem 3.6'de yer almaktadır (Cecco vd., 1981).

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.6)$$

Bu durum, bobinin ürettiği manyetik alanın bir kısmının eddy akımları tarafından emilmesine ve sonuç olarak bobinin toplam manyetik akısının azalmasına neden olur. Bu manyetik akı değişimi, bobinin empedansında bir değişikliğe yol açar ve bu değişiklik, algılama prensibinin temelini oluşturur. Bobin empedansının formülü Denklem 3.7'da verilmiştir (Cecco vd., 1981).

$$Z_p = R_p + jX_p \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'de  $R_p$  bobinin direnç bileşeni,  $X_p$  ise reaktans bileşenidir. Eddy akımı oluşumu sonucunda bobinin empedansı değişerek, ölçülebilir bir manyetik yanıt üretir. Bu özellik, iletkenliği, manyetik geçirgenlik ve test frekansı gibi parametreler kullanılarak sıvı içerisindeki yabancı maddelerin tespit edilmesini sağlar (Cecco vd., 1981).

Bu çalışmada geliştirilen manyetik algılama sisteminde, LC rezonatör devresi olarak tasarlanan düzlemsel bobin (PCB Coil) kullanılmıştır. Bobin, sıvı akış hattının çevresine yerleştirilerek, sıvı içerisindeki hava kabarcıkları ve metal partiküllerin manyetik alan yapısında meydana getirdiği değişiklikleri algılama prensibine dayalı bir sistem tasarlanmıştır. Bu yöntem, sıvı akışı sırasında hava boşluklarından kaynaklanan iletkenlik farkının manyetik alanda oluşturduğu değişimlerin izlenmesi yoluyla, ortamdaki istenmeyen yabancı partiküllerin tespit edilmesine olanak tanır.

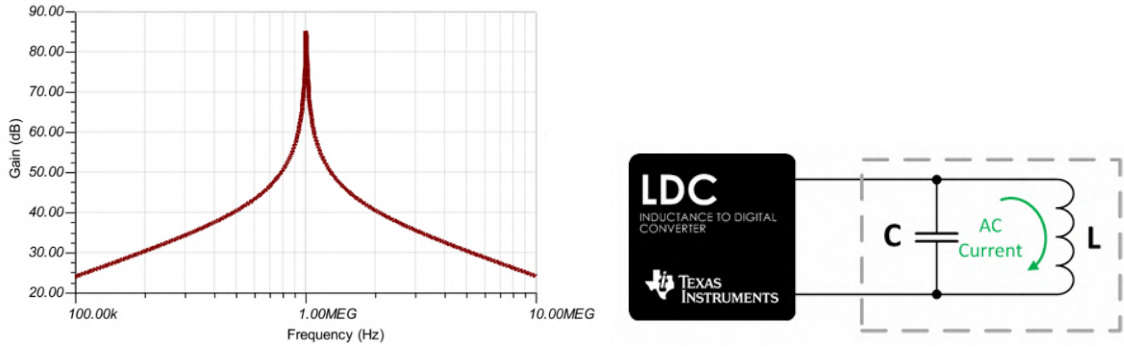
LC rezonatör devresi, bobinin manyetik alanındaki değişimlere duyarlı olup, rezonans frekansında oluşan kaymalar üzerinden hava kabarcıklarının veya metal partiküllerin varlığını belirler. Rezonans frekansı Denklem 3.8'de yer almaktadır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2} - \frac{5 \cdot 10^{-9}}{Q\sqrt{LC}}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de  $L$  bobinin endüktansı,  $C$  ise sistemde kullanılan kapasitans değeridir. Kalite faktörü ( $Q$ ), bir sistemin osilasyon yaparken ne kadar verimli olduğunu ve kayıplara karşı ne kadar dayanıklı olduğunu belirten boyutsuz bir parametredir. Elektrik devrelerinde, özellikle LC rezonatör devrelerinde, filtrelerde ve osilatörlerde

kullanılır. Kalite faktörünün formülü Denklem 3.9'de verilmiştir. Denklem 3.9'de  $R$  devrenin direnç bileşeni,  $L$  endüktans ve  $C$  kapasitans değeridir. LC rezonatör devrelerinde  $Q$  faktörünü yüksek tutmak, ölçüm hassasiyetini artırmak için kritiktir. Şekil 3.3b'deki gibi paralel indüktör ve kondansatörden oluşan bir devre kurulursa, yüksek  $Q$  değerine sahip bir rezonans osilatörü oluşturur. Bu yapı, belirli bir rezonans frekansında maksimum kazanç sağlar ve frekansın bu değerden sapması durumunda kazanç hızla düşer (Beigel, 2018; Instruments, 2016). Bu oluşan grafik Şekil 3.3a'da verilmiştir.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.9)$$

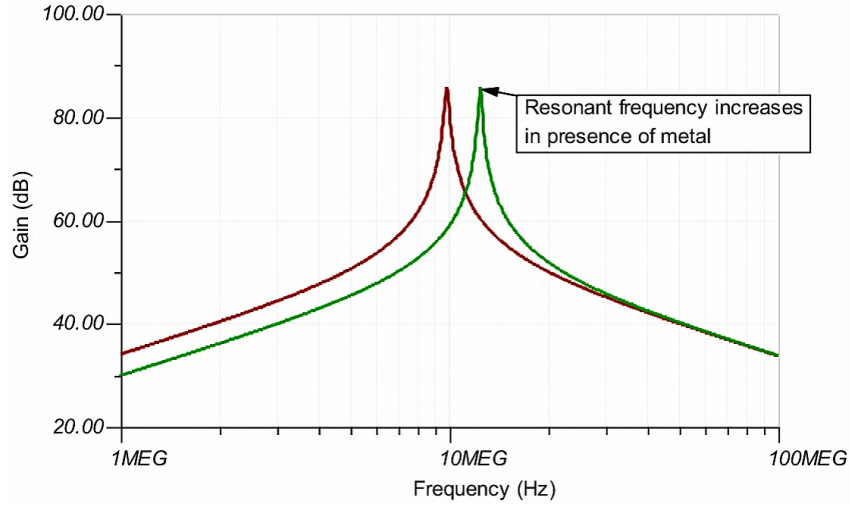


(a) LC rezonatör devresinde kazanç-frekans ilişkisi (b) FDD ile bağlantılı paralel LC rezonatör devresi (Beigel, 2018).

**Şekil 3.3.** LC Rezonatör ve Kazanç-Frekans İlişkisi (a)'da LC rezonatör devresinin kazanç-frekans karakteristiği gösterilmektedir. Rezonans frekansında maksimum kazanç elde edilmektedir. (b)'de paralel LC rezonatör devresi görülmektedir.

Eğer sistem içindeki hava kabarcıkları veya metal partiküller, bobinin manyetik alanını etkilerse, LC devresinin osilasyon frekansı değişecektir ve bu da rezonans frekansında bir kayma yaratacaktır. Bu frekans kaymaları Şekil 3.3b'de gösterildiği gibi FDD entegresiyle algılanmaktadır.

Bu çalışmada, IV sıvısındaki hava kabarcıklarının yanı sıra endüstriyel sıvı içindeki istenmeyen metal partikülleri algılamak için de Eddy akımı temelli endüktif algılama prensibi benimsenmiştir. Metal partiküllerin LC rezonatör tabanlı algılama sistemi üzerindeki etkisi, rezonans frekansında meydana gelen kaymalarla gözlemlenmektedir. Metal partiküllerin yaklaşması, indüktif sensör tarafından üretilen

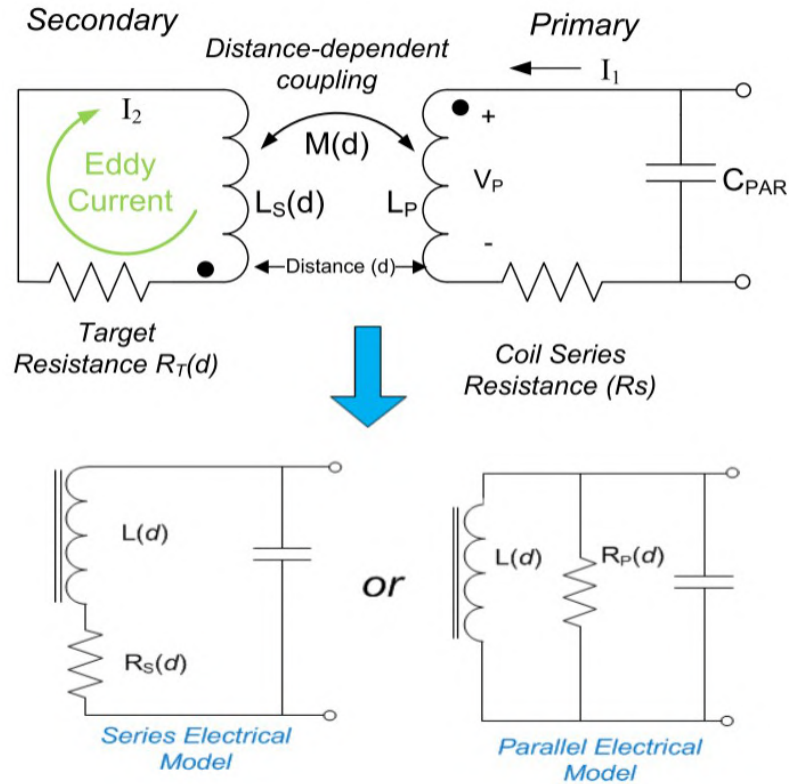


**Şekil 3.4.** Önerilen LC rezonatör tabanlı algılama sisteminin rezonans frekansının kazanç üzerindeki etkisi. Metal varlığında rezonans frekansı artmakta ve kazanç eğrisi sağa kaymaktadır (Instruments, 2016).

manyetik alanla etkileşime girerek metal partiküller üzerinde daha yoğun bir eddy akımı oluşmasına neden olmaktadır. Metal partiküllerin yakınlığına ve metalin özelliklerine bağlı olarak, bu eddy akımları daha güçlü hale gelir ve manyetik alan üzerinde ters bir etki oluşturur. Bu zıt manyetik alan, bobinin endüktansını azaltarak rezonans frekansında bir artışa yol açmaktadır (Instruments, 2016; Beigel, 2018). Rezonans frekansındaki artış Şekil 3.4'te yer alan grafik ile gösterilmektedir. Grafikte, yatay ekseninde frekans (Hz), dikey ekseninde ise kazanç (dB) yer almaktadır. Kırmızı eğri, metal partiküller yokken elde edilen rezonans eğrisini temsil ederken, yeşil eğri metal partiküllerin yaklaşmasıyla birlikte rezonans frekansında meydana gelen kaymayı göstermektedir. Grafikteki tepe noktası rezonans frekansını ifade eder. Rezonans frekansında maksimum kazanca ulaşıldığını ve frekans bu değerden uzaklaştıkça kazancın düştüğünü göstermektedir. Aynı şekilde bu noktada en yüksek Kalite faktörü (Q) değerine sahiptir.

Metal partiküllerin yaklaşması, oluşan zıt manyetik alandan dolayı bobin endüktansını düşürür ve rezonans frekansı artarak sağa doğru kayar. Rezonans noktasında LC devresi maksimum enerji depolama kapasitesine ulaşarak manyetik alan değişimlerine karşı maksimum duyarlılık gösterir. Bu nedenle, algılama işlemi sırasında yüksek hassasiyet elde edilir. Rezonans frekansındaki küçük değişiklikler bile kazançta belirgin farklılıklara yol açar. Bu özellik, metal partiküllerin manyetik alan üzerinde oluşturduğu değişimlerin güvenilir bir şekilde algılanmasını sağlar. Bu fiziksel etkileşim,

Denklem 3.8’de yer alan formül ile ispatlanmaktadır.



Şekil 3.5. Algılama devresinin eş değer gösterimi (Instruments, 2018, 2016)

Tez kapsamında geliştirilen hava kabarcığı ve metal partikül algılama sisteminde, mesafeye bağlı olarak endüktansın değişimi önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Geliştirilen sistemde, algılama performansı hava kabarcığı ve metal partiküllerin bobine yaklaşması veya uzaklaşmasına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim, bobin endüktansını ve dolayısıyla rezonans frekansını doğrudan etkilemektedir. Bu ilişkiyi ifade eden Denklem 3.10’de verilmiştir. Bu formül Denklem 3.8’den türetilmiştir. Şekil 3.5’de, LC rezonatör devresine yaklaşan metal partiküllerin üzerinde oluşan eddy akımını ve bu partiküller üzerindeki etkileşimin eşdeğer devre modelini göstermektedir (Kasemsadeh, 2015).

$$L_s(d) = L_{inf} - M(d) = \frac{1}{(2\pi \cdot f_r)^2 \cdot C} \quad (3.10)$$

Bu denklemde,  $L_s(d)$  mesafeye bağlı olarak değişen endüktans değerini ifade etmektedir. Sensör sistemlerinde bu değişim, hava kabarcığı ya da metal partikülün bobine yaklaşması veya uzaklaşması ile doğrudan ilişkilidir. Endüktans değeri, hedef

nesne ile bobin arasındaki mesafeye bağlı olarak değişmekte olup, bu değişim sensörün algılama hassasiyetini ve performansını doğrudan etkilemektedir.  $L_{inf}$ , hedef nesnenin bulunmadığı durumdaki bobinin endüktansını ifade eder.

$M(d)$ , hedef ile bobin arasındaki manyetik bağlanma katsayısını temsil etmektedir. Hedefin bobine yaklaşması veya uzaklaşması ile bu manyetik bağlanma katsayısı değişmekte, dolayısıyla bobin endüktansı üzerinde doğrudan bir etki oluşturmaktadır. Manyetik bağlanma katsayısı, hedefin manyetik özelliklerine ve uzaklığına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Sensörün rezonans frekansı  $f_r$  olarak adlandırılmakta olup, bobin ve kapasitans birleşimi ile elde edilen doğal titreşim frekansıdır. Bu frekans, sensörün mesafeye duyarlılığını belirleyen kritik bir parametre olarak kullanılmaktadır.

Denklem 3.11’de rezonans devresindeki toplam kapasitans  $C$ , parazitik kapasitans  $C_{PAR}$  ve tank kapasitansı  $C_{TANK}$  toplamından oluşmaktadır:

$$C = C_{PAR} + C_{TANK} \quad (3.11)$$

Burada  $C_{PAR}$ , devredeki parazitik etkilerden kaynaklanan kapasitedir ve istenmeyen bir bileşendir.  $C_{TANK}$  ise rezonans devresindeki ana kapasitans olup, frekans ayarlama için kullanılır. Bu iki kapasitansın toplamı, devrenin toplam kapasitansını oluşturarak rezonans frekansının doğru hesaplanmasına katkı sağlar.

Ayrıca,  $R_P(d)$  paralel direnç olarak tanımlanmakta ve devredeki kayıpları temsil etmektedir. Bu direnç, sensör sürücü akımını belirlemek amacıyla kullanılır ve sistem kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir.

Denklem 3.10, hedefin bobine olan mesafesine bağlı olarak endüktansın nasıl değiştiğini göstermektedir. Hedef yaklaştıkça  $L_s(d)$  azalmakta ve buna bağlı olarak rezonans frekansı artmaktadır. Hedef uzaklaştıkça ise  $L_s(d)$  artmakta ve rezonans frekansı düşmektedir. Bu frekansta, indüktif reaktans ( $X_L$ ) ve kapasitif reaktans ( $X_C$ ) birbirini sıfırlamakta, böylece maksimum genlik ve minimum kayıp elde edilmektedir.

Parazitik kapasitans şu formülle hesaplanır:

$$C_{PAR} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (3.12)$$

Serbest uzayın dielektrik sabiti ( $\epsilon_0$ )  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m olarak alınmış, malzemenin dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) ise FR4 için yaklaşık 4,5 olarak belirlenmiştir. İz

genişliği ile bobin uzunluğunun çarpımı alan ( $A$ ) değerini verirken, izler arası mesafe ( $d$ ) parazitik kapasitansın paydasında yer almaktadır. Alan ( $A$ ), iz genişliği ve bobin çevresine bağlı olarak hesaplanır:

$$\text{Çevre} = \pi \times D \quad (3.13)$$

$$A = W \times (\text{Çevre} \times N) \quad (3.14)$$

$W$  iz genişliği olup 0,001016 m olarak alınmıştır,  $D$  bobin dış çapı olarak 0.058 m ve  $N$  sarım sayısı olarak 15 değerindedir. Parazitik kapasitans değeri bobin yapısının fiziksel özellikleri, PCB tasarımı ve kullanılan malzeme özellikleri göz önüne alınarak elde edilir. Parazitik kapasitans, rezonans frekansının doğru hesaplanması ve algılama performansının optimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Parazitik kapasitans ve indüktans değeri kullanılarak kendi rezonans frekansı (SRF) şu formülle hesaplanır:

$$f_{SRF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{PAR}}} \quad (3.15)$$

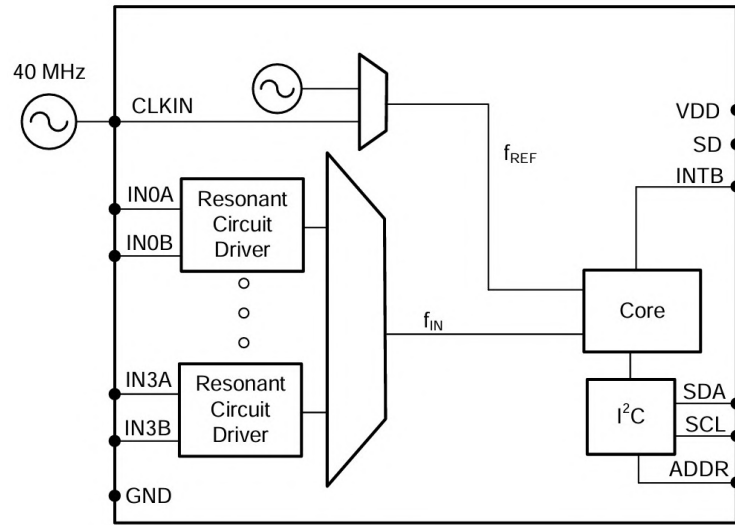
SRF'nin üzerinde çalıştırılan indüktörler, kapasitif karakter kazandığı için ölçümlerin doğruluğu azalır. Bu nedenle, Texas Instruments (TI) tarafından önerilen bir güvenlik sınırı bulunmaktadır:

$$f_{SENSOR} < 0,8 \times f_{SRF} \quad (3.16)$$

Metal partikül ve hava kabarcığı tespitinde parazitik kapasitansın da belirli bir etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmada, Denklem 3.16'daki sınır dikkate alınarak bobinlerin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fakat nihai tasarım karşılıklı yerleştirilmiş bobinlerden oluşmaktadır ve bu konfigürasyondaki ilave parazitik kapasitansın ölçüme etkisi ayrıca analiz edilmemiştir. Bu nedenle, tek coil üzerindeki bastırma yeterliliği esas alınarak, çift coil sisteminde de benzer etkinin geçerli olduğu varsayılmıştır.

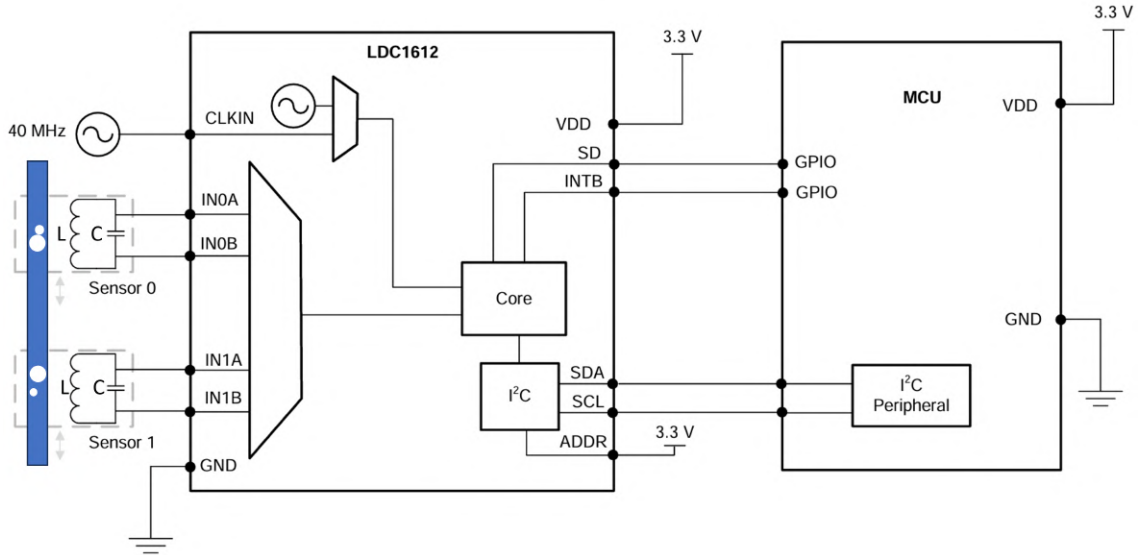
$f_{SENSOR}$ , güvenli çalışma sınırının altında olduğunda sensörün indüktif karakterini koruduğu ve kapasitif davranış sergilemediği anlaşılmaktadır. Bu matematiksel formüller sistemimizin arka planındaki teorik yapıyı oluşturmaktadır. Bu teorik bilgilerle FDD, bir LC rezonatörünün osilasyon frekansını ölçerek sistemdeki fiziksel değişimlere duyarlı hale gelir. Temel olarak, sıvı içindeki hava kabarcıkları veya metal partiküller, manyetik alanın değişmesine neden olur ve bu değişimler rezonans frekansında kaymalara yol açar.

FDD, bu frekans kaymalarını ölçerek verileri dijital sinyallere dönüştürür ve sistemin gerçek zamanlı olarak analiz yapmasını sağlar.



**Şekil 3.6.** Texas Instruments tarafından geliştirilen FDD'nin blok diyagramı (Instruments, 2018, 2016)

Şekil 3.6'deki FDD devre bloğunda, 4 kanal girişi olup rezonatör devre sürücülerini ve I<sup>2</sup>C haberleşme arabirimi ile mikrodenetleyicilere bağlanarak endüktans değişimlerini dijital veriye dönüştürmektedir. Bu entegreler, dar bantlı mimarisi sayesinde elektromanyetik girişimlere (EMI) karşı oldukça dayanıklıdır ve gürültü seviyesini minimuma indirerek hassas ölçümler yapabilmektedir. Çalışma prensibi, osilasyon frekansını sürekli olarak izleyerek sistemde oluşan küçük değişimleri tespit etmeye dayanır. FDD, algılama hassasiyetini artırmak için bir referans frekansı kullanır ve ölçülen sinyalleri bu referans ile karşılaştırarak dijitalleştirir. Test edilen sıvının sıcaklık, yoğunluk veya viskozitesine bağlı olarak sistemin algılama hassasiyetini optimize etmek için frekans ayarlamaları yapılabilmektedir. Aynı şekilde düşük güç tüketimi, kablosuz haberleşme modülleri ile entegre edilebilir olması ve çevresel faktörlere karşı dayanıklılığı, tıbbi ve endüstriyel uygulamalar için geniş bir kullanım potansiyeli sunmaktadır (Instruments, 2016, 2018). Şekil 3.7'de tasarlanan sistemin devre şeması yer almaktadır.



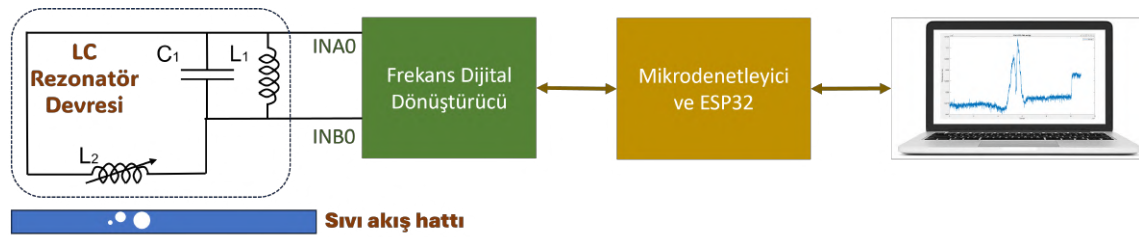
**Şekil 3.7.** Manyetik algılama sisteminde kullanılan FDD ve MCU bileşenlerinin bağlantı yapısını gösteren devre şeması. LC tankın elektriksel eş değer devresi ile birlikte gösterilen bu yapı, sensör sisteminin rezonans temelli çalışmasını sağlayan temel devre elemanlarını içermektedir (Instruments, 2016, 2018).

### 3.1.2. Düzlemsel Bobin (PCB Coil) Tasarımı

Geliştirilen manyetik sıvı akış-hava kabarcığı sensör sisteminin temel algılama birimi LC rezonatör devresinden oluşmaktadır. Şekil 3.7’de bu sistem gösterilmektedir. Bu rezonatör devresi, bobin (L) ve kapasitörden (C) meydana gelmekte olup, devrede oluşan osilasyon sayesinde belirli bir rezonans frekansı oluşturulur. Devre yapısında kapasite değeri sabit tutulduğunda, ortamda bulunan hava kabarcıkları veya metal partiküller nedeniyle ortaya çıkan herhangi bir endüktans değişimi, rezonans frekansında doğrudan ölçülebilir bir kaymaya neden olmaktadır. Bu frekans sapmaları, frekans–dijital dönüştürücü (FDD) entegresi aracılığıyla algılanmakta ve dijital sinyale çevrilerek mikrodenetleyici ile değerlendirilmek üzere aktarılmaktadır.

Yapılan çalışmada indüktans değişiminin hassas ve güvenilir şekilde algılanabilmesi için çeşitli geometrilere sahip düzlemsel PCB bobinler tasarlanmıştır. Bu bobin tasarımları, Şekil 3.9’da gösterilen parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu PCB bobinlerimiz değişken bobin ( $L_2$ ) olarak sistemimizde yer almaktadır. Tasarlanan bu PCB bobinler, sıvı akış hattının üst ve alt kısmına karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki adet düzlemsel PCB bobinden oluşmaktadır. Bobinler arasında yer alan sıvı hattında herhangi bir hava kabarcığı veya metal partikül geçişi sırasında, partiküllerin bobinlerin oluşturduğu manyetik alanı etkilemesi sonucu bobinlerin

endüktans değerleri anlık olarak değişmektedir. Algılama sağlanmaktadır. Rezonatör devresinin kararlı bir osilasyon sağlaması amacıyla, devreye sabit değerli bir referans bobin ( $L_1$ ) ve sabit kapasitör ( $C_1$ ) eklenmiştir. Proje kapsamında, referans bobinin devreye dahil edilmesi ve edilmemesi durumlarında ölçümler yapılmış; yapılan karşılaştırmalı analizlerde ölçüm hassasiyetinde anlamlı bir farklılık gözlemlenmemiş, ancak kararlı osilasyonun sağlanmasında referans bobinin varlığının önemli olduğu sonucuna varılmıştır.



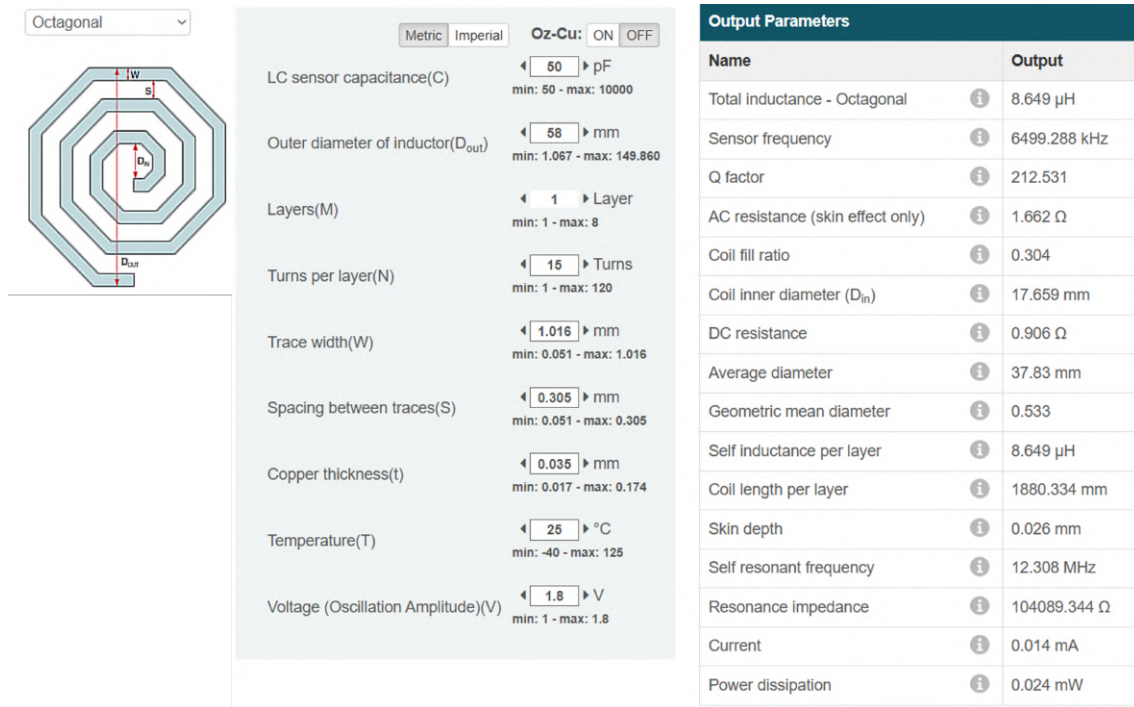
**Şekil 3.8.** Manyetik algılama sisteminin genel yapısını anlatan görsel

Tez kapsamında geliştirilen manyetik sıvı akış-hava kabarcığı sensör sisteminde, sensör tasarımı yapılırken belirli parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Bu parametreler, sensör performansını ve ölçüm doğruluğunu optimize etmek için belirlenmiştir. Şekil 3.9'da parametreler listelenmiştir. Bu parametreler, optimum hassasiyet sağlamak ve algılama performansını artırmak için WEBENCH aracı kullanılarak belirlenmiştir (Instrument, 2025).

Bobin ve kapasitans değerlerinin doğru seçilmesi, sensör sisteminin rezonans frekansını doğrudan belirlemektedir. Seçilen parametreler doğrultusunda elde edilen endüktans ( $L$ ) ve kapasitans ( $C$ ) değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Şekil 3.9'da verilen  $8,649 \mu H$  değerinin yerine, ölçümlerde karşılıklı yerleştirilmiş iki bobin arasındaki manyetik etkileşim nedeniyle LCR metre ile ölçülen  $29,86 \mu H$  değeri kullanılmıştır. Tek başına  $8 \mu H$  olan bobinlerin karşılıklı yerleşimi sonucu oluşan manyetik tünel etkisinin indüktansı artırdığı, manyetik alan homojenliğini sağladığı ve sistem hassasiyetini belirgin şekilde yükselttiği yapılan testler ile kanıtlanmıştır. Bu bağlamda aşağıdaki ölçüm sonucu elde edilen değer hesaplamada temel alınmıştır:

$$L = 29,86 \mu H, \quad C = 33 \text{ pF} \quad (3.17)$$

Bobinin endüktansı ( $L$ ) ve toplam kapasitans ( $C$ ) kullanılarak rezonans frekansı,



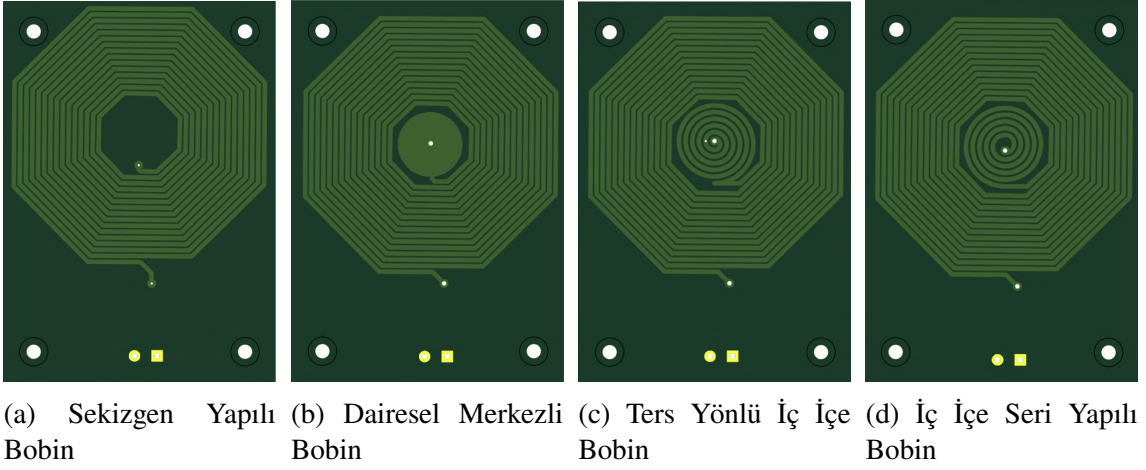
**Şekil 3.9.** Sekizgen bobin geometrisi ve ilgili parametrelerin gösterimi. LC sensör kapasitansı, sarım sayısı, iz genişliği ve diğer tasarım parametreleri verilmiştir. Bu parametreler, FDD devresinde hassas algılama performansı sağlamak amacıyla optimize edilmiştir (Instrument, 2025).

Denklem 3.8'e göre hesaplanmaktadır:

$$f_{\text{SENSOR}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{29,86 \times 10^{-6} \times 33 \times 10^{-12}}} = 5,217 \text{ MHz} \quad (3.18)$$

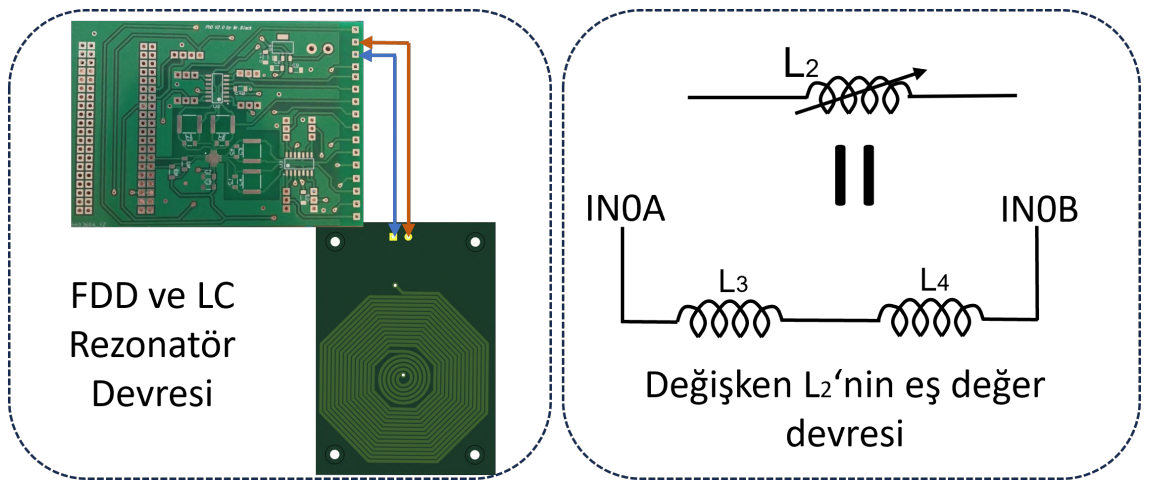
Sensör sisteminin genel blok diyagramı Şekil 3.8'de sunulmuştur. Bu diyagramda gösterilen LC rezonatör devresi, sistemin temel algılama birimini oluşturmakta olup, değişken endüktans ( $L_2$ ) bu çalışmada tasarlanan düzlemsel PCB bobinleri temsil etmektedir. Tasarlanan bobinler, Şekil 3.9'de verilen ilkeler doğrultusunda oluşturulmuş ve çeşitli geometrik formlar kullanılarak optimize edilmiştir. Geliştirilen farklı bobin tasarımları, Şekil 3.10 ve Şekil 3.12'de detaylı olarak gösterilmektedir.

Sıvı içerisindeki hava kabarcıklarını ve metal partikülleri yüksek hassasiyetle algılamak üzere geliştirilen manyetik algılama sisteminin temelini oluşturan düzlemsel bobin (PCB bobin) tasarımları, farklı geometrilerle test edilmiştir. Şekil 3.10b'de gösterilen **Dairesel Merkezli bobin**, merkezindeki yoğun daire yapısı sayesinde spiral sarımların merkezde yoğun bir manyetik alan üretmesi hedeflenmiştir. Şekil 3.10c'de gösterilen **Ters yönlü iç içe bobin**, endüktansı artırması amacıyla oluşturulmuştur. Şekil 3.10d'de gösterilen **İç İçe Seri Yapılı bobin** ise spiral ve sık sarımlı yapısıyla en

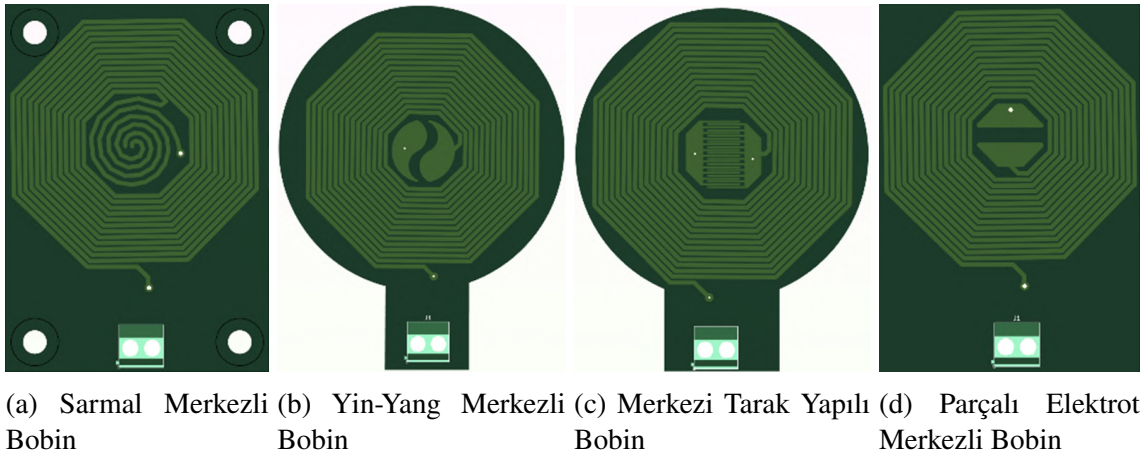


**Şekil 3.10.** Farklı geometrik yapılarla tasarlanmış PCB bobin tasarımı: (a) sekizgen bobin, (b) dairesel merkezli bobin, (c) ters yönlü iç içe bobin ve (d) iç içe seri bobin

yüksek manyetik alan yoğunluğunu üretmiş, özellikle küçük hacimli hava kabarcıkları ve metal partiküllerin algılanmasında en başarılı sonucu vermiştir. Yapılan testler sonucunda iç içe bobin daha yüksek Q ve indüktans değeri oluşturmuştur. LCR metre ölçüm sonuçları ve diğer bobinler ile karşılaştırmalı testler sonucunda en iyi tasarım olarak seçilmiştir. Bu nedenle prototip sistemde bu yapı öncelikli olarak tercih edilmiştir. Yapılan tek bobinli testlerdeki bağlantı şeması ve  $L_2$  bobininin eşdeğer devresi Şekil 3.11’de yer almaktadır. Bu görsel, FDD entegresi ve LC rezonatör devresinin bağlantısını ile planar PCB bobininin ( $L_2$ ) eşdeğer devresini sunmaktadır. Bu eşdeğer devre, Şekil 3.10’deki bobinlerin tek başına bağlantısını ifade etmektedir.



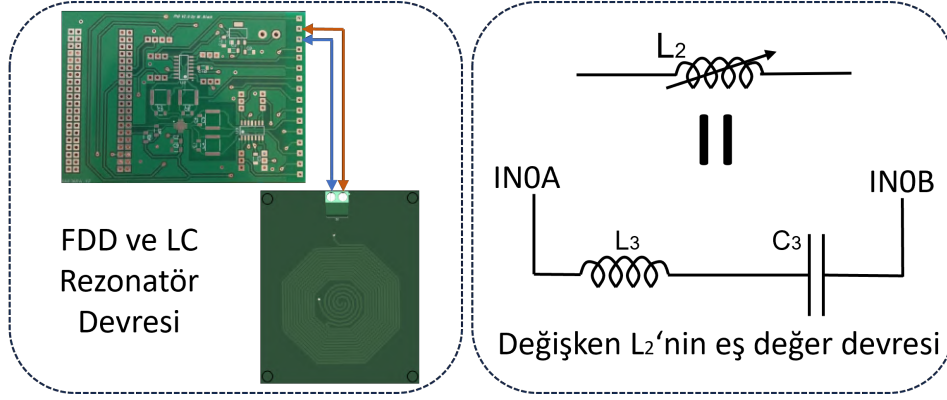
**Şekil 3.11.** FDD kartı ile LC rezonatör devresinin bağlantılarının gösterilmesi ve Önerilen LC rezonatörün eş değer devresi



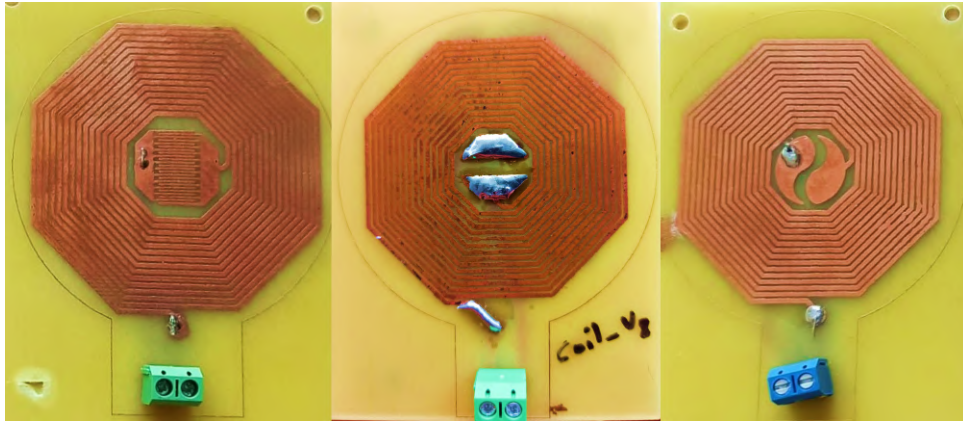
**Şekil 3.12.** Farklı geometrik yapılarla tasarlanmış PCB bobin tasarımı: (a) yin-yang bobin, (b) sarmal bobin, (c) parçalı elektrot merkezli bobin ve (d) tarak yapılı bobin

Manyetik algılama sistemlerinde incelenen çeşitli düzlemsel bobin (PCB bobin) tasarımları arasında Şekil 3.12b’de yer alan **Yin-Yang Bobin**, Şekil 3.12a’deki **Sarmal Bobin**, Şekil 3.12d’da gösterilen **Parçalı Elektrot Merkezli Bobin** ve Şekil 3.12c’deki **Tarak Yapılı Bobin** bulunmaktadır. Bu tasarımlar, dışta sekizgen bir bobin yapısı ile iç kısımda parçalı bir yapıdan oluşan geometrilere sahiptir. Bu konfigürasyonlarda hem endüktans hem de kapasitans değişimleri söz konusudur. Dış sekizgen kısım bobin işlevini üstlenirken, merkezdeki yapı kapasitif bir elemanı temsil etmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar, merkezdeki kapasitif yapının parazitik kapasitansı artırdığını ve bunun da genel algılama hassasiyetini olumsuz etkilediğini göstermiştir. Bu tasarımlar, büyük hacimli hava kabarcıklarının tespitinde başarılı sonuçlar verse de, küçük hacimli kabarcıklarda hedeflenen yüksek doğruluk ve hassasiyet seviyesine ulaşamamıştır. Ayrıca, bu tasarımların ölçüm yapılabilmesi için sabit  $L_1$  bobininin devrede olması zorunludur.  $L_1$  olmazsa osilasyon oluşmadığı için ölçümde yapılamamaktadır. Şekil 3.13’de bu bobinlerin bağlantı şeması ve değişken  $L_2$  bobininin eşdeğer devresi sunulmaktadır. Bu tasarımlar, hava kabarcığı tespitinde potansiyel olması ve bobin çeşitliliğini artırmış olması bakımından önemlidir.

Şekil 3.15’de gösterildiği gibi bobinler seri-paralel bağlı birer LC devresi şeklinde modellenmiştir. Bobin ( $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ ) ve kondansatörle ( $C_1$ ) birlikte rezonans devresi oluşturarak, fiziksel ortam değişikliklerini elektriksel olarak yansıtır.

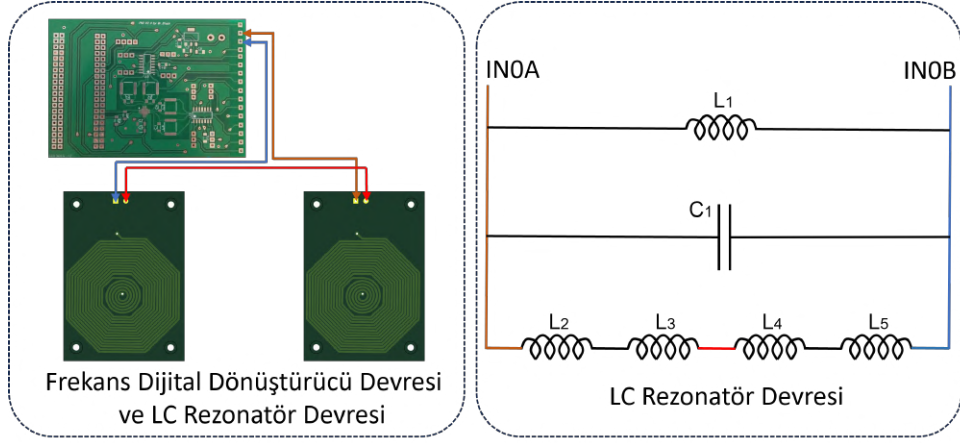


**Şekil 3.13.** FDD kartı ile LC rezonatör devresinin bağlantılarının gösterilmesi ve Önerilen LC rezonatörün eş değer devresi



**Şekil 3.14.** Tasarlanan Tarak Yapılı, Parçalı Elektrot Merkezli ve Yin-Yang bobinin üretilmiş hali

Bu yapı sayesinde hava kabarcığı veya metal partiküller bobinlerin üzerinden geçtiğinde, bobinin endüktansında oluşan değişim rezonans frekansını etkiler ve sistem bu değişimi tespit eder. Bu etkileşim hava kabarcığının veya metal partiküllerin konumuna ve yoğunluğuna bağlı olarak sinyalin genliğinde ve frekansında değişimler üretir. Bobinlerin karşılıklı yerleştirilmiş olması, algılama hacminin ortasında yoğun ve kararlı bir manyetik alan bölgesi oluşmasını sağlar. Bu manyetik tünel etkisi, algılanmak istenen partikülün manyetik alanı keserek sistemde belirgin bir sinyal üretmesini mümkün kılar. Böylece yüksek hassasiyetli ve hızlı tepki veren bir sensör sistemi elde edilir. Oluşan frekans değişimleri doğrudan hava kabarcığı veya metal partiküllerin varlığına işaret eder. Gerçekleştirilen testlerin sonucunda her bir bobin'in avantaj ve sınırlılıkları detaylı biçimde analiz edilmiş; elde edilen bulgular ışığında sistem için en uygun geometrik yapılar belirlenerek prototipleme sürecinde bu tasarımlar tercih edilmiştir. Şekil 3.16'de, sistemde kullanılan en uygun bobin prototipi gösterilmektedir.



**Şekil 3.15.** FDD kartı ile LC rezonatör devresinin bağlantılarının gösterilmesi ve Önerilen LC rezonatörün eş değer devresi

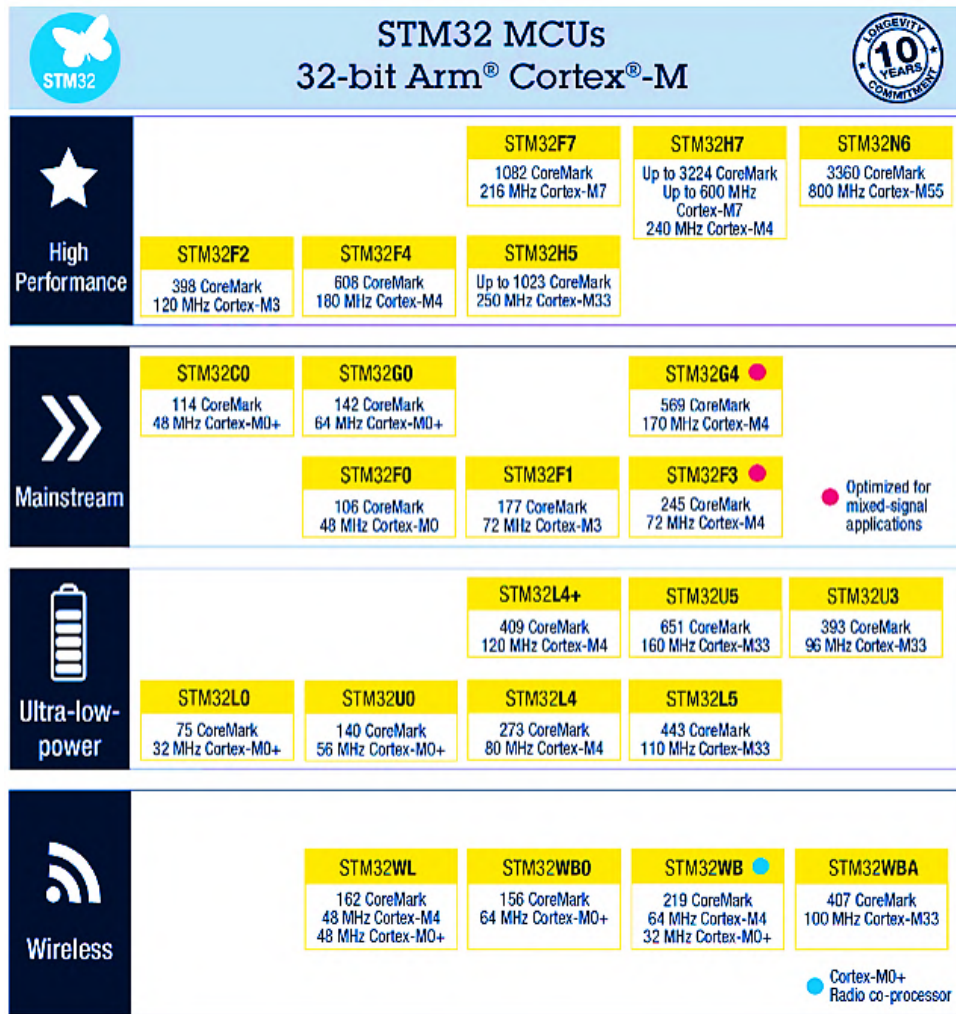
$L_2, L_3, L_4, L_5$  seri bağlı olduğu için toplam endüktans  $L_{\text{seri}}$  aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$L_{\text{seri}} = L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (3.19)$$

$$L_{\text{inf}} = \frac{L_{\text{seri}} \cdot L_1}{L_{\text{seri}} + L_1} \quad (3.20)$$

$$C_{\text{TANK}} = C_1 \quad (3.21)$$





Şekil 3.17. STM32 ailesine ait Cortex-M tabanlı mikrodenetleyicilerin gösterimi (ST, 2025)

donanım desteğiyle hızlı geliştirme imkânı sağlamaktadır. Kablosuz haberleşme için ise, sistemde ESP32 modülü kullanılmıştır. Bu modül sayesinde, mikrodenetleyici tarafından işlenen veriler TCP/IP tabanlı olarak bilgisayara iletilmekte ve geliştirilen C# tabanlı arayüz yazılımı ile gerçek zamanlı izleme ve uyarı sistemi oluşturulmuştur. Bu sayede geliştirilen yapı, hem yerel hem de uzaktan erişime olanak sağlayan esnek ve bütünlük bir sensör sistemi haline gelmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan mikrodenetleyici olarak STM32F103 modelinin tercih edilmesi, uygulamanın gereksinimlerine uygun teknik ve yapısal avantajlarının bir sonucu olarak belirlenmiştir. ARM Cortex-M3 tabanlı bu mikrodenetleyici, 72 MHz'e kadar ulaşabilen işlemci frekansı sayesinde yüksek veri işleme kapasitesi sunmaktadır. Geliştirilen sistemin temel amacı, sıvı içerisindeki hava kabarcıklarını ve metal partikülleri hassas biçimde algılayarak gerçek zamanlı analiz etmektir. Bu bağlamda,

STM32F1 MCU Series 32-bit Arm® Cortex®-M3 – Up to 72 MHz												
	Product line	FCPU (MHz)	Flash (Kbytes)	RAM (Kbytes)	USB 2.0 FS	FSMC	CAN 2.0B	3-phase MC Timer	I <sup>2</sup> S	SDIO	Ethernet IEEE1588	HDMI CEC
<ul style="list-style-type: none"> <li>-40 to 105°C range</li> <li>USART, SPI, I<sup>2</sup>C</li> <li>16- and 32-bit timers</li> <li>Temperature sensor</li> <li>Up to 3x12-bit ADC</li> <li>Dual 12-bit ADC</li> <li>Low voltage 2.0 to 3.6V (5V tolerant I/Os)</li> </ul>	STM32F100 Value line	24	16 to 512	4 to 32		•		•				•
	STM32F101	36	16 to 1M	4 to 80		•						
	STM32F102	48	16 to 128	4 to 16	•							
	STM32F103	72	16 to 1M	4 to 96	•	•	•	•	•	•		
	STM32F105 STM32F107	72	64 to 256	64	•	•	•	•	•	•	•	

Şekil 3.18. STM32F1 serisine ait mikrodenetleyicilerin temel teknik özellikleri (ST, 2025)

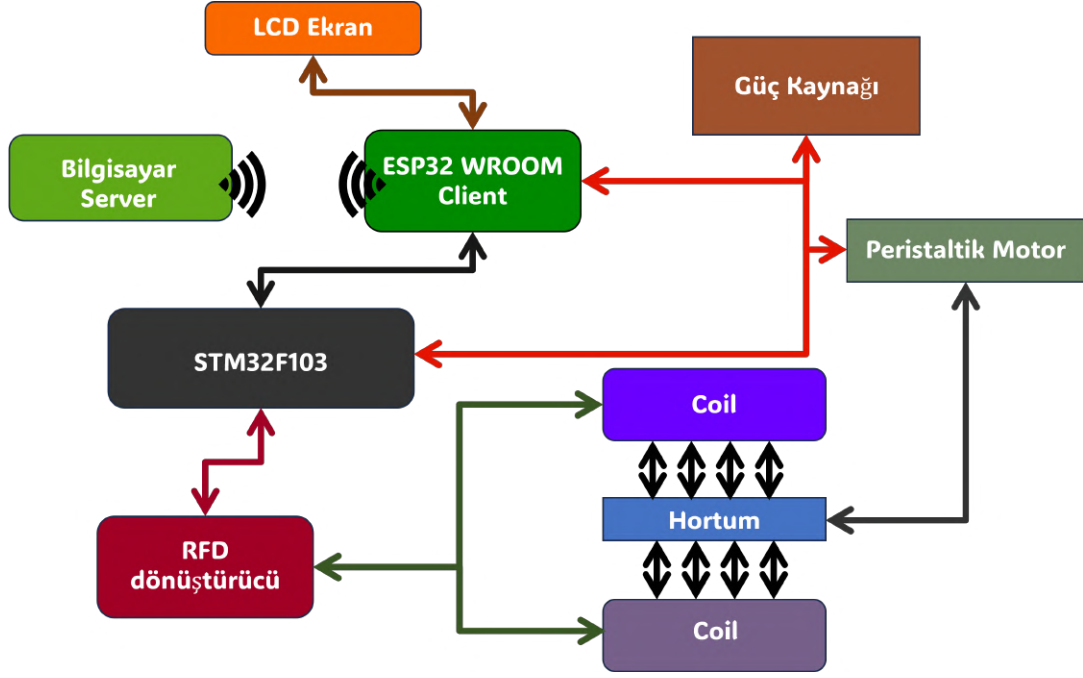
yüksek hızlı veri toplama ve işleme yetenekleri kritik öneme sahiptir.

Şekil 3.18’da gösterilen STM32F1 serisine ait mikrodenetleyiciler incelendiğinde, STM32F103 modeli, hem işlemci frekansı hem de bellek kapasitesi bakımından öne çıkmaktadır. Örneğin, STM32F100 modeli yalnızca 24 MHz işlemci frekansı ve sınırlı RAM kapasitesiyle gerçek zamanlı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. STM32F101 serisi ise işlemci frekansı açısından sınırlıdır. STM32F103 modeli, 1 MB’a kadar Flash bellek ve 96 KB’a kadar RAM kapasitesi ile gerekli sinyal işleme algoritmalarının gereksinimlerini karşılamaktadır. Aynı zamanda I<sup>2</sup>C ve SPI gibi dijital haberleşme protokollerini aynı anda yönetebilme imkânı sunmaktadır.

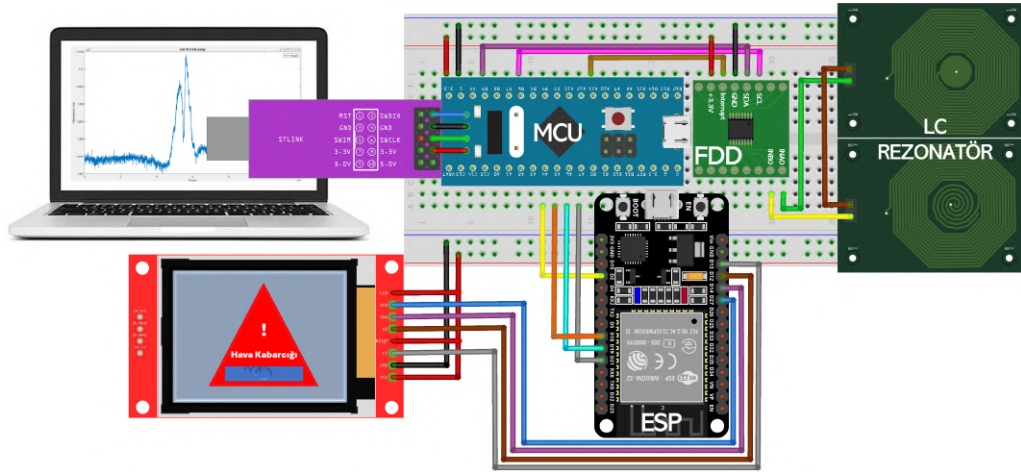
Ayrıca, sensör verilerinin hızlı bir şekilde toplanarak değerlendirilmesi için yüksek çözünürlüklü çok kanallı ADC (Analog-Dijital Çevirici) desteği de bu mikrodenetleyici üzerinde yer almaktadır. Aynı zamanda USB, CAN ve Timer gibi gelişmiş çevresel birim desteğiyle, farklı modüllerle entegrasyon kabiliyetini de artırmaktadır. Bu doğrultuda, STM32F103 mikrodenetleyicisi, geliştirilen sensör sisteminin tüm işlevsel, performans ve entegrasyon ihtiyaçlarını karşılayabilecek yeterlilikte olduğu için tercih edilmiştir. Bu seçim hem sistemin güvenilirliğini artırmakta hem de medikal ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini genişletmektedir.

Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de sistemin bağlantı şeması gösterilmektedir. Sistemde

ESP32 Wi-Fi modülü, haberleşme ve kullanıcı arayüzü görevlerini üstlenmektedir. Bu modül, sistemin dış dünya ile iletişimini sağlayarak veri aktarımı ve görsel bilgilendirme işlevlerini yerine getirmektedir. Önerilen sistemde bir adet ESP32 modülü yer almaktadır ve *Human-Machine Interface (HMI)* olarak işlev görmektedir.



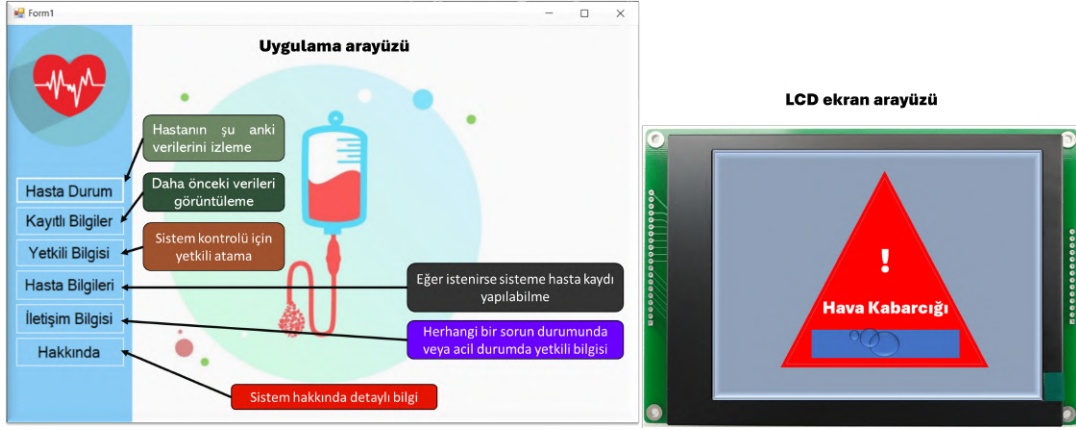
Şekil 3.19. Manyetik algılama sistemimizin bağlantı şeması



Şekil 3.20. Geliştirilen düzeneğin elektronik bağlantı gösterimi

ESP32 modülü cihaz üzerine entegre edilmiş ekran aracılığıyla çalışmakta ve hava kabarcığı ile metal partikül tespiti durumlarını LCD ekran üzerinden kullanıcıya anlık

olarak sunmaktadır. Bu modül, STM32F103 ile SPI protokolü üzerinden haberleşmekte ve işlenen verileri doğrudan kullanıcıya aktarmaktadır. Aynı zamanda bilgisayara bağlı olarak çalışmakta ve TCP/IP protokolü ile sürekli veri iletimi sağlayarak bilgisayardaki C# tabanlı arayüz uygulamasıyla haberleşmektedir. Bu sayede sistem durumu uzaktan ve gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Şekil 3.21’de C# tabanlı arayüz ve LCD ekran arayüzü gösterilmektedir.



**Şekil 3.21.** Hasta izleme sistemi arayüzü ve hava kabarcığı algılama uyarısı. Sol tarafta hastaya ait bilgiler ve izleme seçenekleri, sağ tarafta hava kabarcığı tespit edildiğinde verilen uyarı gösterilmektedir.

Bu yapı, geliştirilen manyetik sıvı akış-hava kabarcığı sensörünün medikal ve endüstriyel uygulamalarda güvenilir, esnek ve uzaktan erişilebilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. STM32F103'ün işlem kapasitesi ve çevre birimi desteği ile ESP32'nin kablosuz iletişim olanaklarının birleşimi, sistemin kapsamlı kontrol ve izleme altyapısı olarak işlev görmesini sağlamaktadır.

## 3.2. Deneysel Kurulum

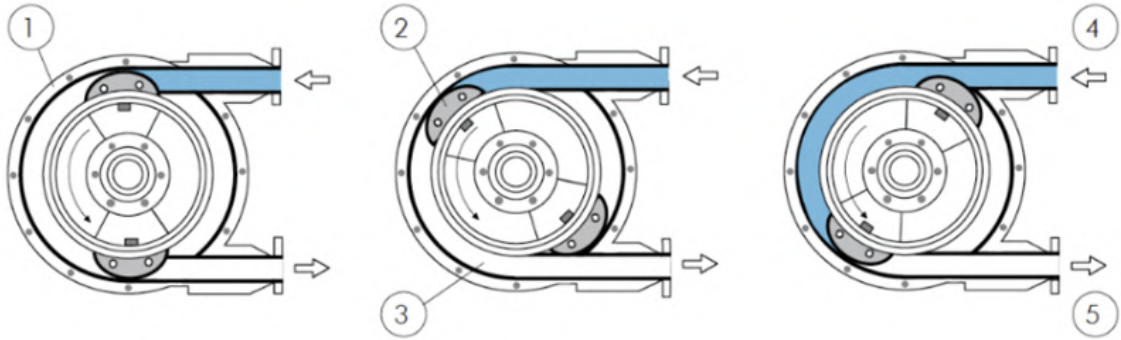
### 3.2.1. Laboratuvar Test Düzeneği

Bu çalışmada geliştirilen manyetik akış-hava kabarcığı algılama sisteminin doğruluğunu ve hassasiyetini değerlendirmek amacıyla laboratuvar ortamında kontrollü bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Kurulan test sistemi, sıvı akışını simüle edebilen, hava kabarcıkları ve metal partiküller kontrollü biçimde sisteme enjekte edilebildiği ve

algılama birimlerinin gerçek zamanlı olarak veri toplayabildiği bir yapıda tasarlanmıştır. Deney düzeneğinde şeffaf sıvı hortumu kullanılarak hem medikal hem de endüstriyel sıvılar test edilmiştir. Medikal sıvı olarak intravenöz (IV) infüzyon solüsyonları tercih edilmiş olup, bu sıvılar insan vücuduna damar yolu ile verilen steril çözeltileri temsil etmektedir. Endüstriyel uygulamaları temsil etmesi amacıyla ise yüksek viskoziteli lubricant yağ kullanılmıştır. Sıvı akışı, hassas debi kontrolüne imkân tanıyan peristaltik pompa ile sağlanmıştır. Şekil 3.22’de sıvı akış hattında sıvının hızını ayarlamak için kullanmış olduğumuz peristaltik motor yer almaktadır.



(a) Peristaltik pompa motoru(Amazon, 2025)



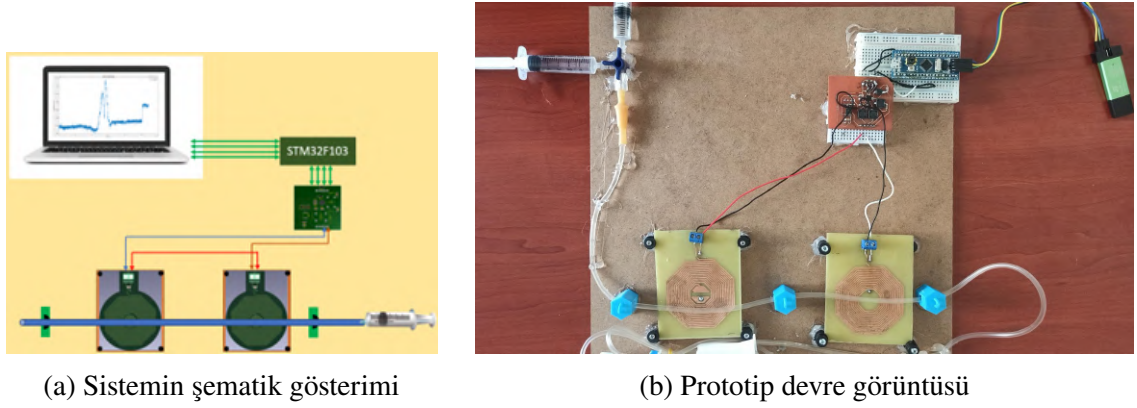
(b) Peristaltik pompa akış prensibi(Endüstri, 2025)

**Şekil 3.22.** Sistemin sıvı akışını oluşturan Peristaltik pompa

Algılama modülü, sekizgen spiral yapıda tasarlanmış düzlemsel bobinler sıvı hattının alt ve üst kısmına yerleştirilmesiyle manyetik tünel etkisi oluşturacak biçimde konumlandırılmıştır; bu yapı sayesinde sıvı içerisinde geçen hava kabarcıkları ve metal partiküller, bobinlerin rezonans frekansı üzerinde doğrudan etkili olmuş ve bu değişimler ölçülebilmektedir. Bobinler, LC rezonatör devresiyle birlikte çalışarak FDD üzerinden frekans değişimlerini dijital olarak mikrodenetleyiciye (STM32F103) aktarmış, elde edilen veriler kaydedilmiştir. Veriler, MATLAB programları aracılığıyla analiz edilmiş; eşik değerlerine göre kabarcık ya da partikül tespiti yapılmış, frekans değişimleri

grafiksel olarak görselleştirilmiş ve sistemin algılama kararlılığı değerlendirilmiştir. Deneylerde sıvı olarak IV ve endüstriyel yağlar kullanılmıştır. Testlerin her biri farklı boyutlardaki hava kabarcıkları ve metal partiküllerle tekrar edilmiştir. Deneylerin doğruluğunu sağlamak ve istatistiksel güvenilirliği artırmak amacıyla her test senaryosu en az 10 kez tekrar edilmiştir.

Geliştirilen manyetik sıvı akış-hava kabarcığı algılama sistemi, ilk olarak temel prensiplerin test edilebileceği bir düzenek ile prototiplendirilmiştir. Bu prototip Şekil 3.23’de yer almaktadır. Bu ilk versiyonda, baskı devre (PCB) üzerine yerleştirilmiş planar bobinler doğrudan sıvı geçiş hattı altına sabitlenmiş, STM32F103 mikrodenetleyici ile veriler toplanmış ve bilgisayara aktarılmıştır ve MATLAB ortamında görselleştirilmiştir.



**Şekil 3.23.** Algılama sisteminin ilk prototip tasarımı ve test düzeneği

FDD’de kullanılan register kodlamaları, sensörün doğru çalışması ve algılama hassasiyetinin optimize edilmesi için kritik önem taşımaktadır. Tablo 3.1’de, önemli registerların adresleri, işlevleri, bizim seçtiğimiz değerler ve açıklamaları verilmiştir.

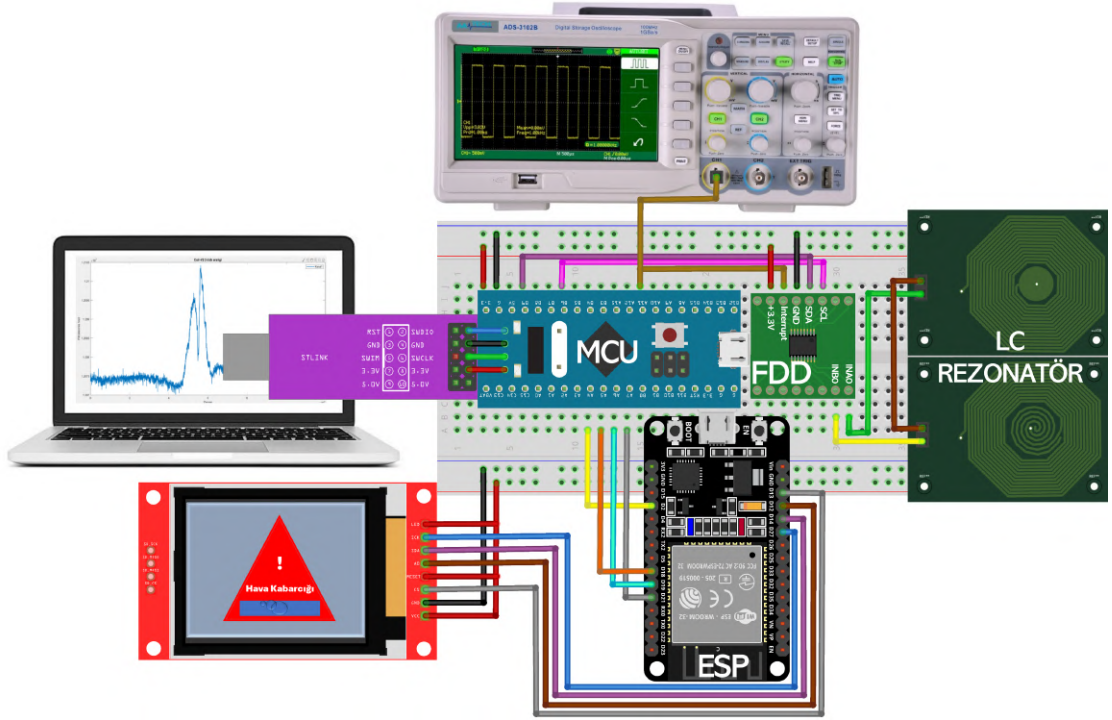
**Çizelge 3.1.** Algılama sisteminin optimum sonuç vermesi için ayarlanan register tablosu

Register Adresi	Register Adı	Seçilen Değer	Açıklama
0x08	RCOUNT (CH1)	0xFFFF	Dönüşüm süresini ayarlar. 4 kanal için 100 Hz frekans sağlar. Yüksek değerde hassasiyet artar.
0x09	RCOUNT (CH2)	0xFFFF	İkinci kanalın dönüşüm süresini belirler. 100 Hz frekans değeri ile yüksek hassasiyet elde edilir.

Register Adresi	Register Adı	Seçilen Değer	Açıklama
0x0A	RCOUNT (CH3)	0xFFFF	Üçüncü kanalın dönüşüm süresi. Düşük frekansta yüksek çözünürlük sağlar.
0x0B	RCOUNT (CH4)	0xFFFF	Dördüncü kanalın dönüşüm süresidir. 100 Hz ile kararlı ölçüm sağlar.
0x10	SETTLE_COUNT (CH1)	0x0200	İlk kanalın kararlılık süresini belirler. Manyetik alan değişimlerine karşı duyarlılığı artırır.
0x11	SETTLE_COUNT (CH2)	0x0200	İkinci kanalın kararlılık süresi. Yüksek değerlerde daha fazla kararlılık sağlar.
0x14	CLOCK_DIVIDERS	0x1000	Saat bölücü ayarları. Diferansiyel modda çalışmak için kullanılır.
0x1A	CONFIG	0x1401	Konfigürasyon ayarı. Harici saat kaynağı seçilmiş ve cihaz aktif hale getirilmiştir.
0x1B	MUX_CONFIG	0x020D	Otomatik tarama (Auto-Scan) ve giriş filtresi genişliği (deglitch) 1 MHz olarak ayarlanmıştır.
0x1E	DRIVE_CURRENT (CH1)	0xFFFF	Sensörün osilasyon genliği (pk) değerini ayarlamak için maksimum akım seçilmiştir.
0x1F	DRIVE_CURRENT (CH2)	0xFFFF	İkinci kanal için maksimum akım. Yüksek genlikte kararlı algılama sağlar.
0x19	STATUS_CONFIG	0x3821	Hata bildirimini açtırır. Sensörün çalışma durumunu izlemek için kullanılır.

Tablo 3.1’de verilen değerler, optimum performans sağlamak için belirlenmiştir. Özellikle dönüşüm süresi ve sürücü akımı ayarları, algılama hassasiyetini ve kararlılığı artırmak için maksimum değerlerde tutulmuştur. Ayrıca saat bölücü ve konfigürasyon ayarları, sensörün doğru çalışması için gerekli parametreleri içermektedir.

Sistemin doğru ve güvenilir ölçüm yapıp yapmadığını teyit edebilmek amacıyla bazı kontrol ve testlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yapılan testler, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



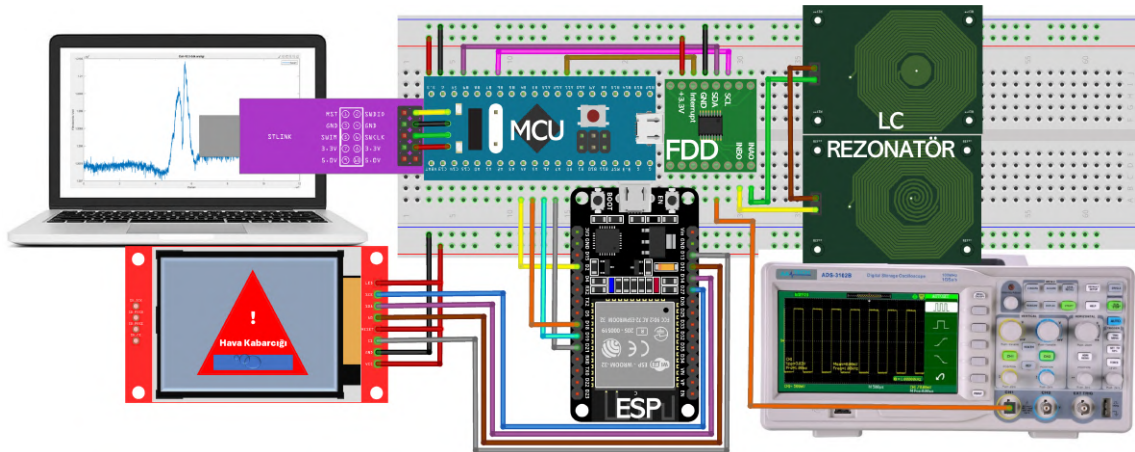
Şekil 3.24. Algılama kanallarının doğrulama sürecine ait düzenek



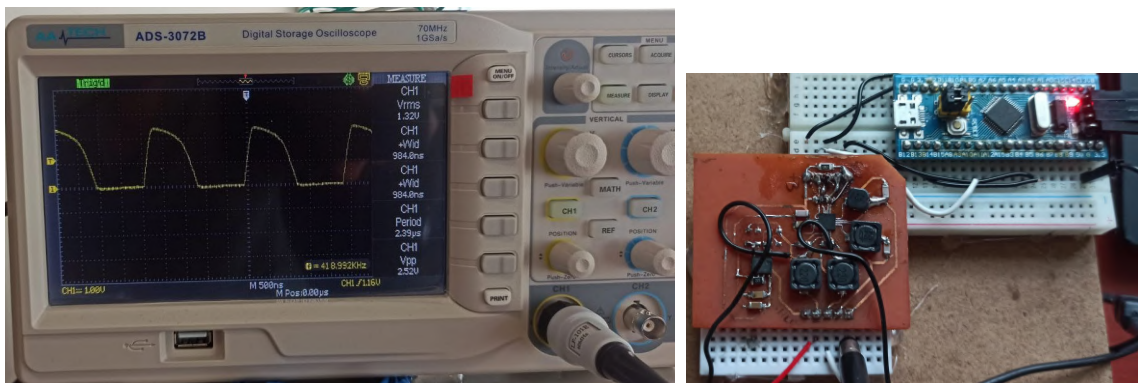
Şekil 3.25. FDD devremizin Interrupt girişinin osiloskop ile test edilmesi

Her bir algılama kanalı, bağımsız olarak osiloskop ile test edilerek, her kanalın aynı örüntüyü oluşturup oluşturmadığı incelenmiştir. Bu kapsamda, frekans değerleri gözlemlenmiş ve her kanalın osilasyon genliğinin (sensor oscillation amplitude (pk)) 1,2 V ile 1,8 V aralığında olup olmadığı değerlendirilmiştir. Bu sınırlar dışında kalan kanallar için, sistemin hassasiyetini artırmak amacıyla kod üzerinde DRIVE\_CURRENT parametresi değiştirilmiş ve ilgili kanalların kalibrasyonu sağlanmıştır.

Ayrıca, sistemin kesme (interrupt) girişleri de kontrol edilerek, kare dalga sinyalinin elde edilip edilmediği gözlemlenmiştir. Kare dalga sinyalinin tespit edilememesi durumunda, haberleşme sorunu olduğu değerlendirilmiş ve bu durumda STM32 kartı ile FDD devresinin iletişim kontrolü yapılmıştır. Bu sayede, olası bağlantı problemleri erken safhada belirlenmiş ve gerekli düzeltmeler uygulanmıştır.

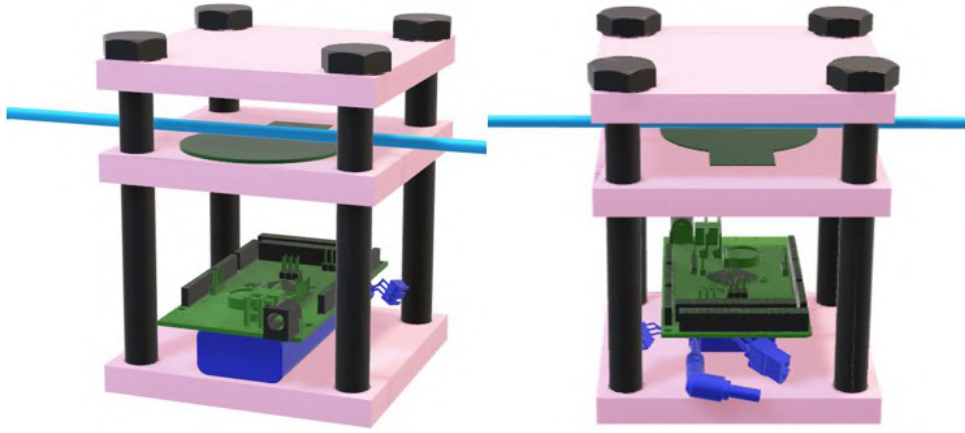


Şekil 3.26. FDD dönüştürücü devresine ait kanalların osiloskop ile ölçüm testleri



Şekil 3.27. FDD dönüştürücü devresine ait kanalların osiloskop ile ölçüm testleri

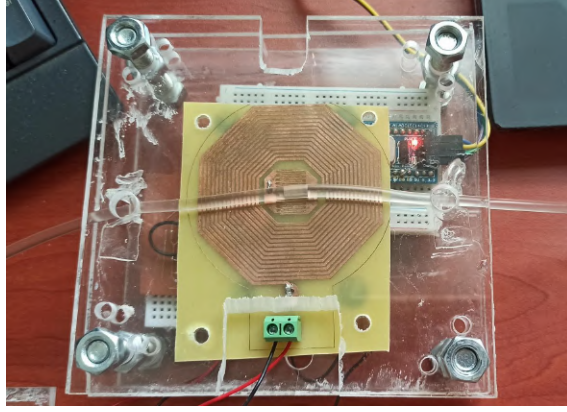
Yapılan test denemeleri sonucunda test düzeneğinde iyileştirmelerin gerektiğine karar verilmiştir. İlk test düzeneğinde karşılaşılan mekanik problemleri çözebilmek için, planar bobinler pleksiglas plakalara entegre edilerek cıvata ve somun yardımıyla sağlamlaştırılmıştır. Bu yapının gösterimi Şekil 3.28’de gösterilmektedir. Bu geliştirilen test ortamı sayesinde hem kararlılık sağlanmış hem de sistemin daha modüler ve yeniden kullanılabilir hale gelmesi mümkün olmuştur. Bu aşama, sistemin fiziksel güvenilirliğini artırmış ve deneysel verilerin tekrar edilebilirliğini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Şekil 3.31’de üretilen test ortamının görselleri yer almaktadır.



**Şekil 3.28.** Geliştirilen test ortamının 3B gösterimi

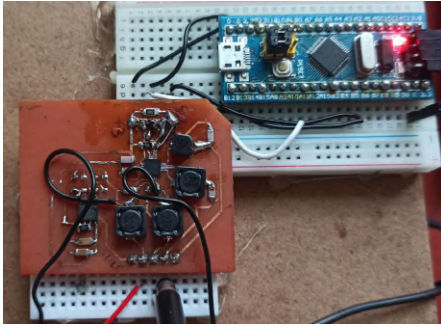
Sistem tasarımının daha kompakt, taşınabilir ve bütünleşik bir yapıya kavuşması adına Şekil 3.28’de gösterildiği gibi üç boyutlu bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapı 2 ara kattan oluşmaktadır: orta katta planar bobinler ve sıvı akış hattı, alt katmanda ise FDD devresi, mikrodenetleyici, ESP ve güç devresi bulunmaktadır. Bu modüler yapı sayesinde hem üretilebilirlik kolaylaştırılmış hem de sistemin elektromanyetik koruma açısından daha kararlı çalışması sağlanmıştır. Bu oluşturulan test ortamında yapılan testler sırasında çekilmiş görsel Şekil 3.29’de yer almaktadır. Bu test düzeneğinde farklı hava boyutlarında hava kabarcıkları LC rezonatör devremiz üzerinden geçirilmiş ve frekans kaymaları gözlemlenmiştir.

Şekil 3.30’de görüldüğü üzere, tasarlanan sistemin elektronik bileşenleri ve ilk test ortamı düzenekleri sunulmaktadır. Tasarlanan ilk sistemde FDD devre kartının kendi imkanlarımızla üretilmiş olması ve sistemdeki kabloların çevresel gürültüden etkilenebilecek bir yapıda olması ölçüm doğruluğunu kararsızlaştırmaktaydı. Sistemdeki

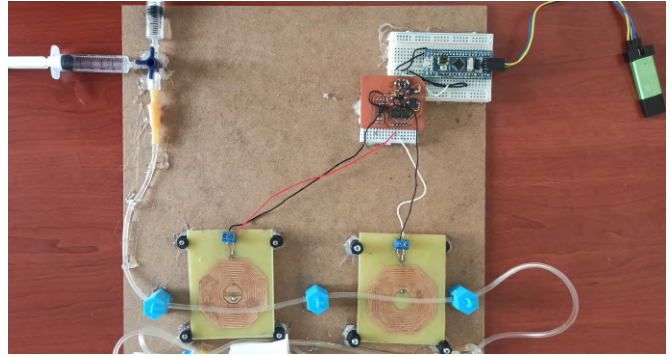


**Şekil 3.29.** Geliştirilen test ortamında yapılan denemeler

pcb bobinlerinde açık alanda olması tek sıvı hattındaki değişimleri değil, çevresel farklılıklara da duyarlı olmasını sağlıyordu. Bu tür sistemimizi olumsuz etkileyen sebeplerden dolayı yeni bir test ortamının gerekliliğini ortaya koymuştur.



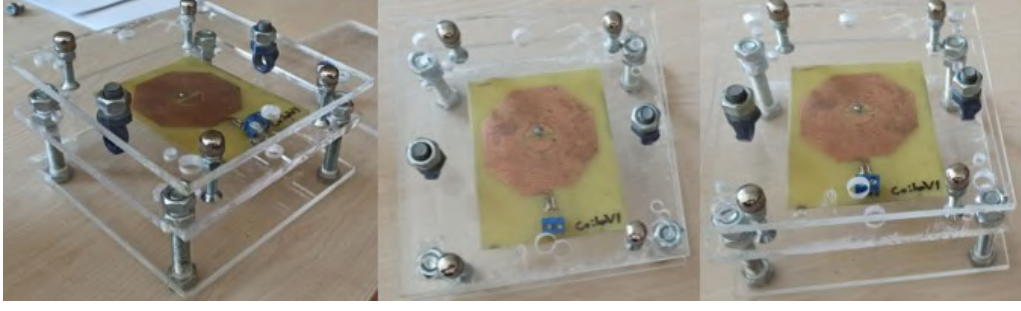
(a) Tasarlanan test ortamının elektronik bileşenleri



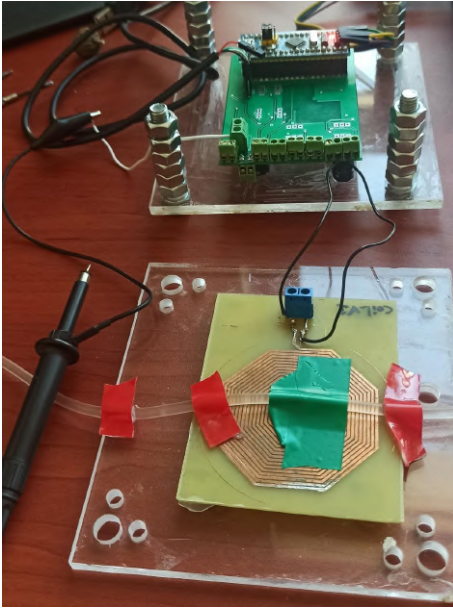
(b) İlk test ortamının görüntüleri

**Şekil 3.30.** Tasarlanan sistem

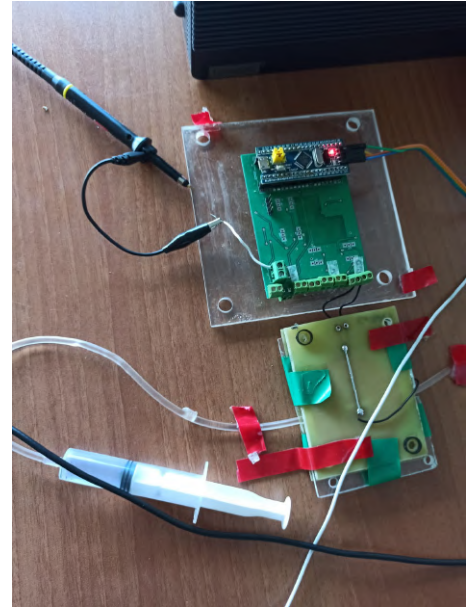
Şekil 3.31’de geliştirilen test düzeneğinin genel görünümü sunulmaktadır. Bu şekilde tasarlanan yeni test düzeneği daha prototip ve taşınabilir bir hal almış ve sistemin gözlenebilirliğini artırmıştır. Bu sistemde en üstteki ara katmana yerleştirilen planar bobinlerimiz üst katmanın kapalı olmasından dolayı çevreden gelen gürültülerden daha az etkilendiği ve bu amaçla bobinlerin daha hassas sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.31. Geliştirilen test düzeneğinin gösterimi



(a) Yapılan testler sırasında çekilmiş resim

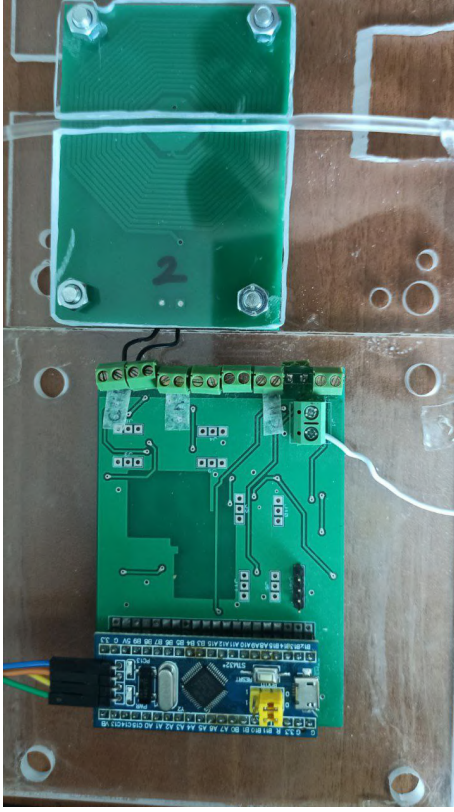


(b) Karşılıklı iki bobin arasından geçen serum hortumu ve test ortamı

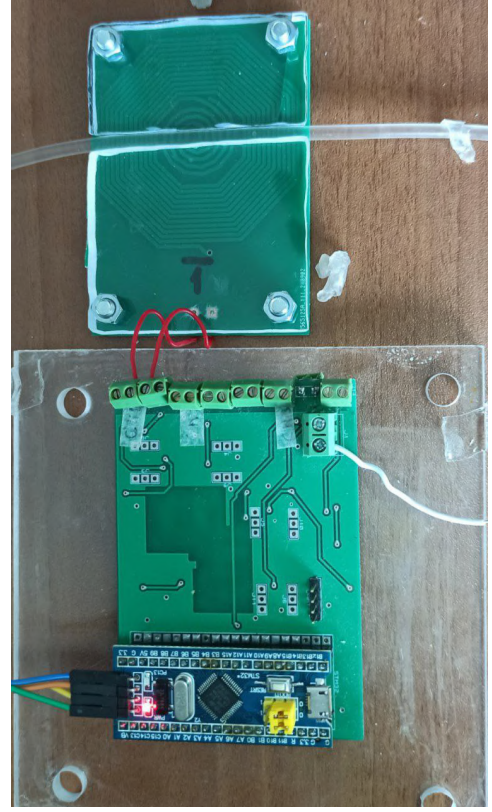
Şekil 3.32. Tasarlanan test ortamı

Şekil 3.32’de yapılan testlerin görüntüleri yer almaktadır. Şekil 3.32a’de yapılan testte yeni tasarlanan ve üretilen üzerinde MCU ve FDD sistemlerinin bütünleşik olduğu kart ile yapılan test görülmektedir. Bu yeni PCB kart ile sistem testleri yapılmış, önceden kablolar ile yapılan bağlantılar ortadan kaldırılarak tek kart ile sistem oluşturulmuştur. Birçok kanaldan PCB bobin bağlanabileceği bu sistem, ölçüm sonuçlarını da olumlu yönde etkilemiştir. Şekil 3.32b’de bobinlerin farklı bağlanması ile elde edilen bir test görüntülenmektedir. Bu bobinler karşılıklı bağlanarak daha yüksek kazanç değeri elde edilmiş ve iki farklı bobinin tek bir bobin olarak kullanılması Q değerimizi artırarak hassasiyetini artırmış ve endüktansdaki değişimlere karşı duyarlılık artmış ve bununla

birlikte rezonans frekansındaki kaymalar belirginleşmiştir.



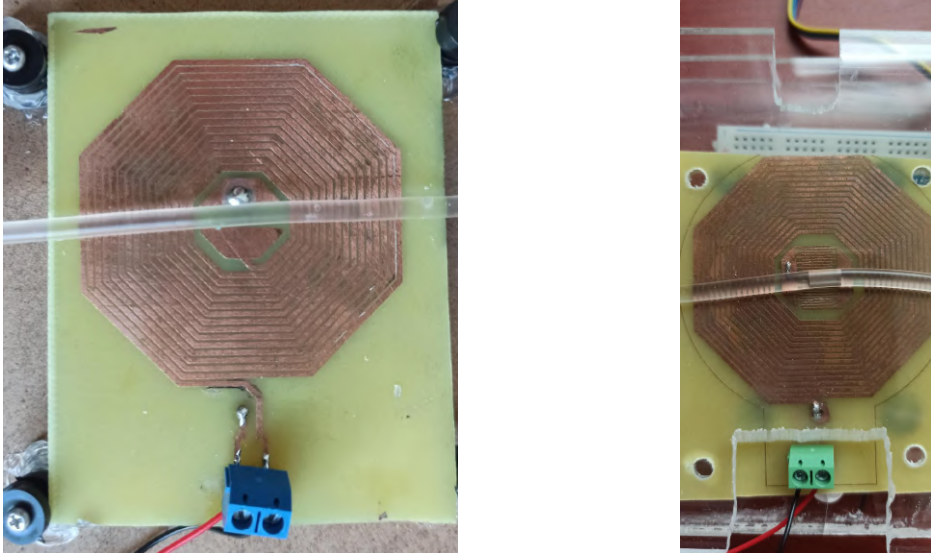
(a) Parçalı Elektrot Merkezli bobin üzerinde yapılan test görüntüleri



(b) Sarmal bobin üzerinde yapılan test görüntüleri

**Şekil 3.33.** Farklı bobinlerde yapılan test görüntüleri

Şekil 3.33’da Parçalı elektrot merkezli bobin ve sarmal bobin yapıları üzerinde yapılan testlerin görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3.34’de görüldüğü üzere, bobin üzerinden küçük boyutlu ve büyük boyutlu hava kabarcığı geçişleri sırasında çekilmiş görüntüler verilmiştir. Küçük boyutlu hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen görüntü Şekil 3.34a’da, büyük boyutlu hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen görüntü Şekil 3.34b’de yer almaktadır.

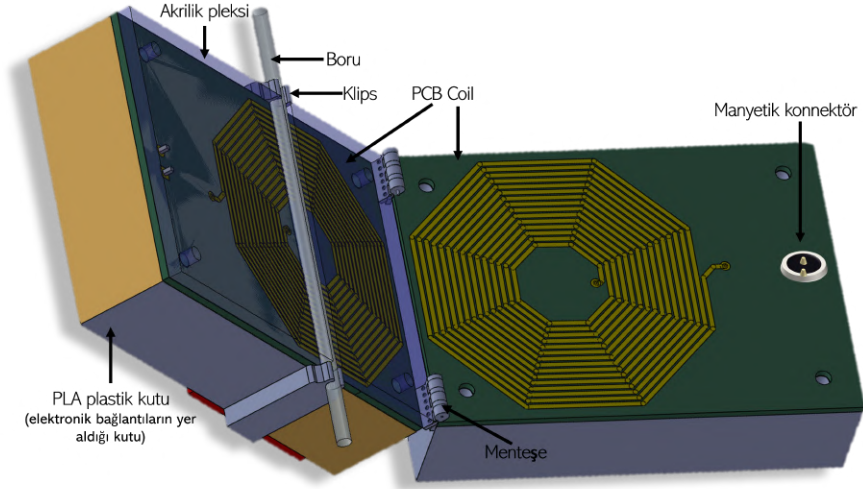


(a) bobin üzerinden küçük boyutlu hava kabarcığı geçerken çekilmiş görüntü (b) bobin üzerinden hava kabarcığı geçerken çekilmiş görüntü

**Şekil 3.34.** bobin üzerinden hava kabarcığı geçerken çekilmiş iki farklı görüntü

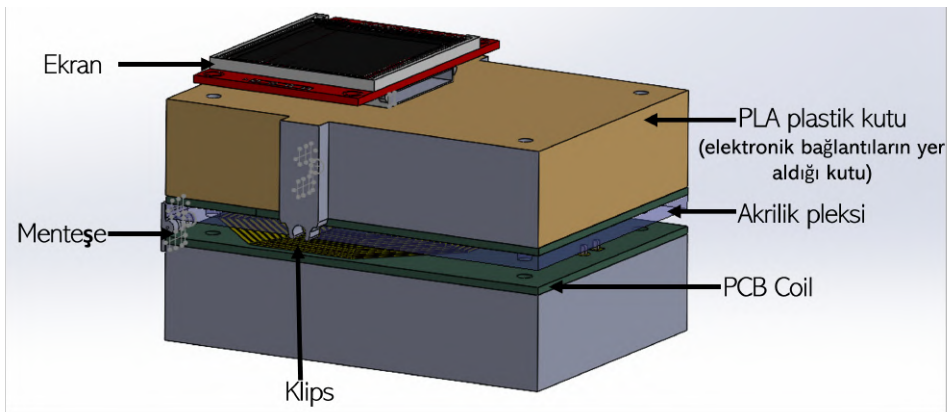
Yapılan denemeler sonucunda önerilen sistemin ihtiyaçlara yönelik geliştirilmesi gerektiği ve daha kompakt uygulanabilir sistem ihtiyacı olduğu ve bu sistemin nihai tasarıma uygun olacak şekilde tasarlanması gerektiği kanatine varılmıştır. Nihai durum için, tüm elektronik ve mekanik bileşenleri entegre eden kompakt bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu yapıda LCD ekran modülü, çift katmanlı bobin yapısı, FDD ve mikrodenetleyici tek bir gövde içerisine yerleştirilmiştir. Sıvı akış hattı, bobinlerin merkezinden geçecek şekilde hizalanmış ve mekanik olarak sabitlenmiştir. Bu haliyle hava kabarcıkları ve metal partikülleri algılayabilmekte ve sonuçları ekranda gösterebilmektedir. Bu tasarım, hem laboratuvar testleri hem de taşınabilir uygulamalarda kullanılabilir düzeye ulaşmıştır.

Şekil 3.35’de nihai prototipin mekanik tasarımı görülmektedir. Bu yapı, tüm elektronik ve mekanik bileşenleri tek bir gövde içerisinde toplayarak kompakt bir çözüm sunmaktadır. Sistemimizin en önemli özelliği sıvı akış sisteminin değişiminin çok daha kolay olmasıdır. Manyetik konnektörler yardımıyla sistemimiz açılıp kapanmakta ve veri aktarımını yine bu konnektörler ile yapmaktadır. Bu şekilde açılıp kapanan bu tasarımda tüm elektronik bileşenler PLA plastik kutu içerisinde yer almakta ve bu kutu içerisinde aluminyum kaplama ile kaplanmasından dolayı faraday kafesi etkisi oluşturmakta ve dışarıdan kaynaklanabilecek ölçüm hatalarını azaltmaya yardımcı olacaktır. Klipler ile



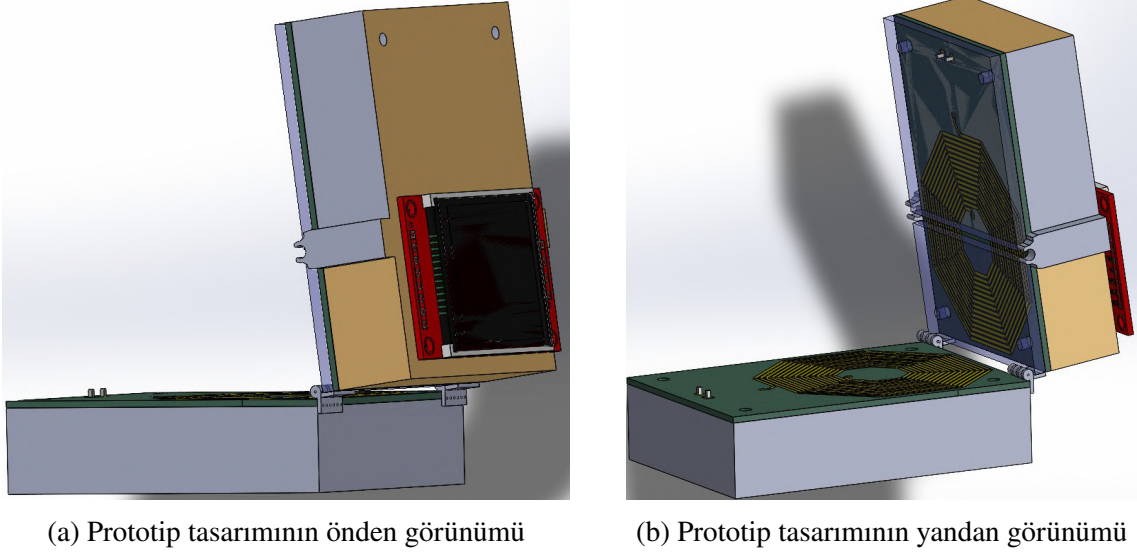
**Şekil 3.35.** Nihai prototipin mekanik tasarımı

borumuzun hareketi sınırlanmış olacaktır. Şekil 3.36'de nihai prototipi oluşturan bileşenler detaylı olarak sunulmuştur. LCD ekran modülü, bobin yapısı ve diğer bileşenler görülebilir. Bu kapalı gösterimi incelendiğinde ekran üzerinden sistem durumu takip edilebilirken, kapalı boyutunun 10x7x6 boyutlarında olması kutunun taşınabilirliğini ve kompaktlığını ortaya koymaktadır.



**Şekil 3.36.** Prototipin bileşenlerinin gösterimi

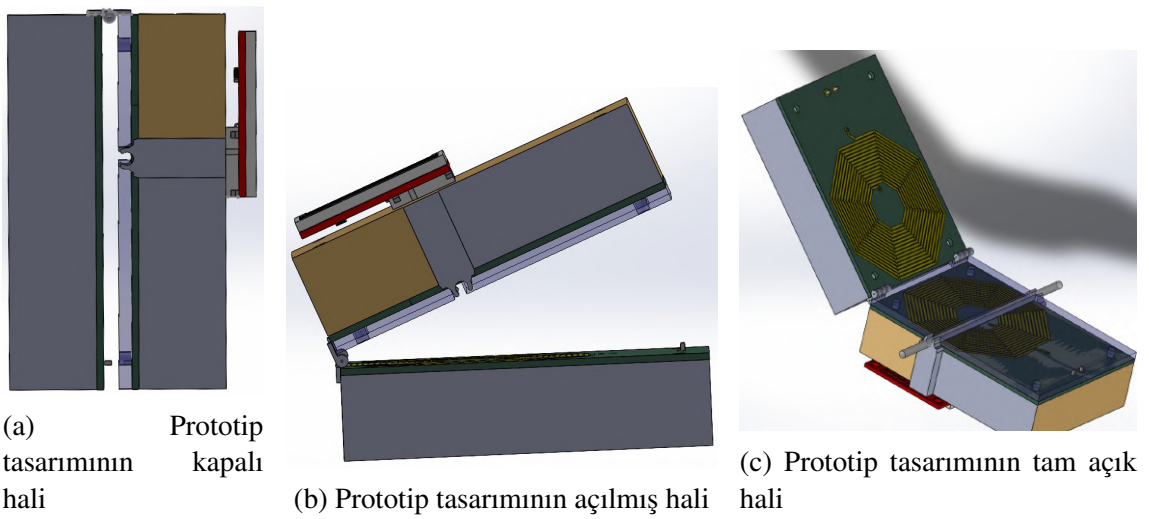
Şekil 3.37'de prototip tasarımının önden ve yandan görünümü verilmiştir. Bu



**Şekil 3.37.** Manyetik algılama sistemi için geliştirilen 3D prototip tasarımının farklı açılardan görünüşleri

açılar, cihazın yapısal bütünlüğünü ve bileşen yerleşimini görselleştirmektedir. Şekil 3.38’de manyetik algılama sistemi prototipinin kapalı, kısmen açık ve tamamen açık halleri sunulmaktadır. Bu görseller, cihazın taşınabilirlik ve modülerlik özelliklerini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, sistemin ilk kablolu ve dağıntık prototipinden başlayarak tam entegre bir sensör sistemine evrilmesi, hem mühendislik tasarımı hem de uygulama açısından önemlidir. Bu süreç, sistemin uygulanabilirliğini, taşınabilirliğini artırmıştır.



**Şekil 3.38.** Manyetik algılama sistemi için geliştirilen 3D prototip tasarımının farklı görünüşleri

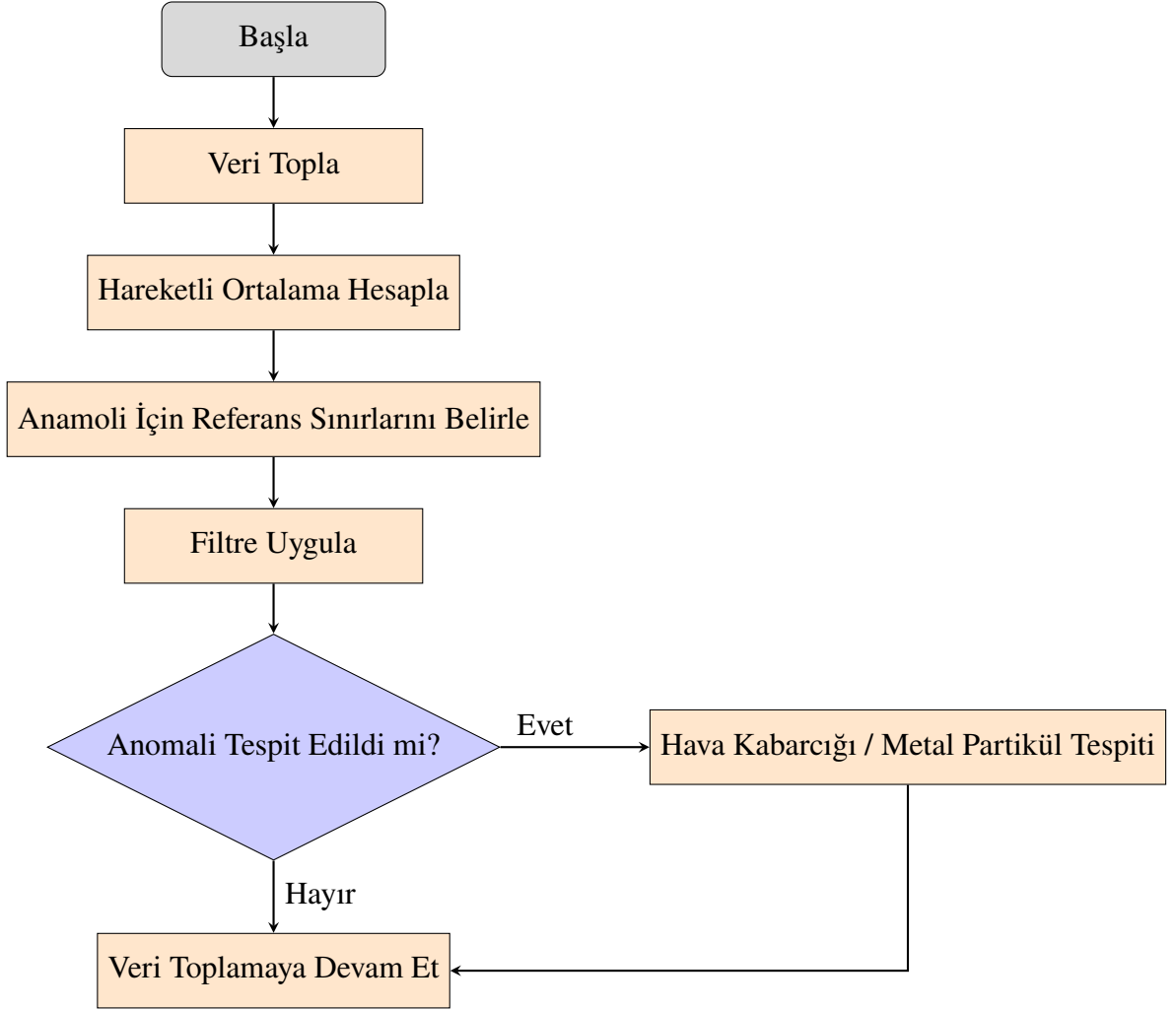
### 3.2.2. Kalibrasyon

Geliştirilen manyetik sıvı akış-hava kabarcığı algılama sisteminin doğruluk ve güvenilirliği, yalnızca donanımsal tasarım kalitesine değil, aynı zamanda sistemin çevresel değişkenliklere karşı gösterdiği adaptasyon yeteneğine de bağlıdır. Gerçek zamanlı olarak çalışan bu tür algılama sistemlerinde, ortam koşullarının fiziksel parametreler üzerindeki etkisi göz ardı edilemeyecek düzeydedir. Özellikle sıvının yoğunluğu, sıcaklığı, iletkenliği ve viskozitesi gibi özelliklerin yanı sıra, sistemin fiziksel konumlandırılması ve çevresel elektromanyetik etkiler de algılama performansını doğrudan etkilemektedir.

Bu çerçevede, sistemin farklı ortamlarda kararlı ve güvenilir biçimde çalışabilmesi için başlangıçta kendini kalibre edebilen bir yazılım altyapısına ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan testlerde, farklı sıvı türleri ve deney koşullarında sistemin temel sinyal seviyesinde anlamlı sapmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, sabit eşik değerleri üzerinden çalışan sistemlerin yanlış pozitif ya da negatif sonuç üretmesine neden olmakta; dolayısıyla ortam koşullarına duyarlı, dinamik bir kalibrasyon yaklaşımı zorunlu hale gelmektedir.

Bu ihtiyaca cevap verebilmek amacıyla sistemin açılışında otomatik olarak çalışan bir kalibrasyon algoritması geliştirilmiştir. Başlangıçta belirlenen sürede toplanan veriler, hareketli ortalama yöntemi ile işlenmiş ve sistemin o ortama özgü referans sinyal seviyesi belirlenmiştir. Bu yöntemde her yeni örnekle birlikte ortalama değer güncellenmekte, böylece geçmiş verilerin tamamını saklamaya gerek kalmadan sistem kendisini ortama göre dengelemektedir. İlk uygulamalarda kalibrasyon süresi 60 saniye olarak belirlenmiş, ancak yapılan karşılaştırmalı analizler neticesinde bu sürenin 10 saniyeye indirilmesinin yeterli olduğu ve benzer doğrulukta sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu iyileştirme sayesinde sistemin başlangıç gecikmesi azaltılmış, özellikle zaman hassasiyeti taşıyan uygulamalarda daha verimli bir yapı elde edilmiştir.

Her sistemin açılışında gerçekleşen kalibrasyon sonucunda elde edilen referans değerden sapmalar, sistem tarafından anomali olarak değerlendirilmektedir. Anlık veriler ile referans değer arasındaki fark hesaplandıktan sonra, bu fark yüksek geçiren filtre ile işlenerek, düşük frekanslı ve yavaş değişen sinyaller bastırılmış; ani değişimlerin ön plana çıkması sağlanmıştır. Bu sayede sistem, düşük genlikli ve kısa süreli anormallikleri daha net şekilde tespit edebilmiştir. Bu algoritma şeması, Şekil 3.39'da gösterilmiştir.



Şekil 3.39. Anomali Tespit Algoritması

Geliştirilen algoritma ilk olarak MATLAB ortamında uygulanarak test edilmiş ve başarıyla sonuçlandırılmıştır. Ortamdan alınan veriler üzerinde yapılan analizlerde sistemin kalibrasyon sonrasında anomali tespitinde yüksek doğrulukla çalıştığı görülmüştür. MATLAB ortamında elde edilen bu başarılı sonuçların ardından algoritma, mikrodenetleyiciye entegre edilerek gerçek zamanlı uygulama koşullarında çalıştırılmış ve gömülü sistem üzerinde de benzer doğrulukta çıktılar alınmıştır. Böylece önerilen kalibrasyon yöntemi, hem simülasyon ortamında hem de donanımsal sistem üzerinde tutarlı bir biçimde doğrulanmıştır.

Ayrıca bu yapı, yalnızca doğruluk açısından değil, sistemin kaynak kullanımı bakımından da önemli avantajlar sağlamaktadır. Hareketli ortalama yöntemi sayesinde bellek gereksinimi minimum seviyede tutulmuş, sadece tek bir değişken üzerinden işlem yapılması sağlanarak mikrodenetleyici tabanlı gömülü sistemlerde hafıza kullanımının optimize edilmesi mümkün olmuştur.

Sonuç olarak, önerilen bu kalibrasyon yapısı sayesinde sistem, farklı ortamlarda kararlı şekilde çalışabilmiş ve hem hava kabarcığı hem de metal partikül tespitinde yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Kalibrasyon süreci, sistemin uygulanabilirliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda gerçek zamanlı izleme ve müdahale gerektiren medikal ve endüstriyel uygulamalarda sistemin güvenilirliğini önemli ölçüde pekiştirmiştir.

### 3.3. LCR ile Bobin Performans Analizi

Manyetik algılama sistemlerinin performansı, sistemde kullanılan bobinlerin elektromanyetik özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, düzlemsel yapıdaki baskı devre bobinlerinin (*PCB coil*) endüktans ( $L$ ), kalite faktörü ( $Q$ ), eşdeğer seri direnci (ESR), empedansı ( $Z$ ) ve diğer elektriksel parametrelerinin doğru ve güvenilir şekilde ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu parametreler, sensör sisteminin rezonans davranışını, algılama duyarlılığını ve frekansa bağlı tepkisini belirleyen temel karakteristiklerdir. Bu çalışmada, geliştirilen bobinlerin karakterizasyonu amacıyla yüksek hassasiyetli UNI-T UT622E model bir LCR metre kullanılmıştır. Ölçümler, her bobin için 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz ve 100 kHz frekanslarında ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

LCR metreler, bir bileşenin empedansını bileşenlerine ayırarak hem reel hem

de reaktif kısmı ölçebilmekte, bu sayede bobinlerin hem enerji saklama kapasitesi hem de kayıp özellikleri ayrı ayrı değerlendirilebilmektedir. Özellikle  $Q$  faktörü, bobinlerin manyetik alan içinde ne kadar verimli çalıştığını gösterir ve yüksek  $Q$  değerleri, dar bantlı ve seçici algılama sağlar. Bu sayede sistem, küçük değişimlere karşı daha duyarlı hale gelir. Ölçülen  $Q$  değerleri, kullanılan bobin geometrisine ve frekansa bağlı olarak değişmiş; bazı geometrilere 100 kHz frekansında 5'in üzerinde değerler elde edilmiştir. Örneğin, dairesel merkezli bobin 100 kHz'de  $Q = 5,35$  ile en yüksek kalite faktörünü sunmuş; iç içe bobin ise  $Q = 4,93$  ile benzer şekilde yüksek performans göstermiştir. LCR metre ile ölçüm sırasında çekilen görüntüler Şekil 3.40 ve Şekil 3.41'de gösterilmektedir.



Şekil 3.40. LCR metre ile çeşitli bobinlerin test edilmesi

ESR (eşdeğer seri direnç), bobinlerde meydana gelen enerji kaybını temsil eder. Düşük ESR, daha düşük ısı kaybı ve daha yüksek rezonans kararlılığı anlamına gelir. Ölçümler sonucunda, ESR değerleri düşük frekanslarda daha büyük çıkarken, yüksek frekanslarda belirgin şekilde azalmış; bu da rezonans frekansına yakın çalışma koşullarında daha ideal sonuçlar alınabileceğini göstermektedir. Özellikle iç içe ters ve dairesel merkezli bobinlerde yüksek frekansta  $ESR < 0,25 \Omega$  seviyelerine inildiği görülmüştür.

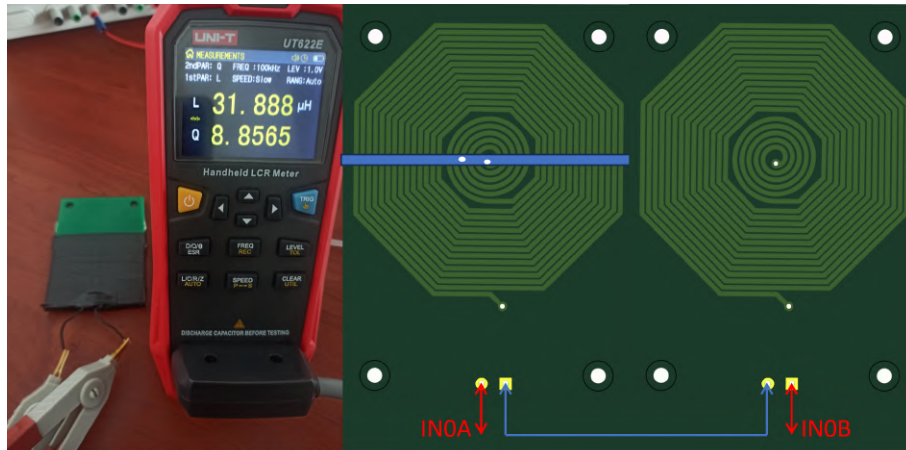
Diğer önemli parametrelerden biri olan DCR (doğru akım direnci), bobin izlerinin doğrudan iletkenlik özelliğini ve toplam bakır kayıplarını belirler. Tüm bobinlerde DCR değeri yaklaşık  $0,95 \Omega$  ile  $1,61 \Omega$  arasında kalmış ve kullanılan bakır iz



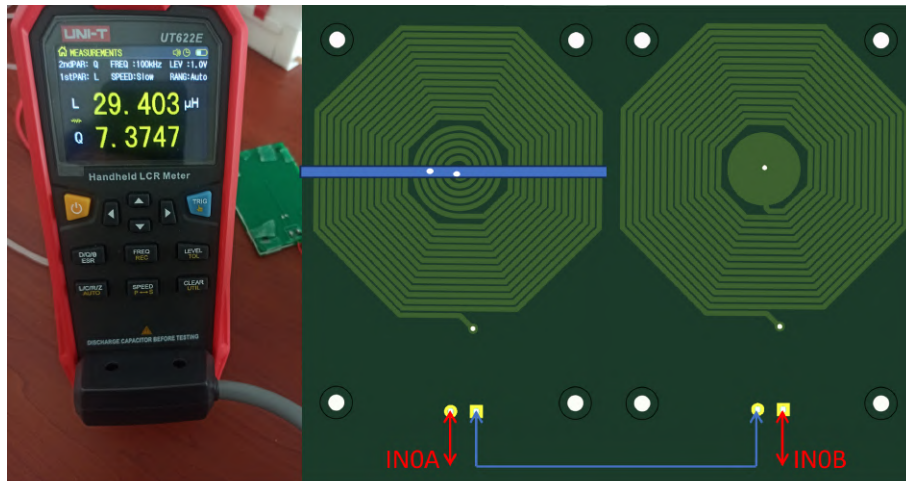
Tablonun devamı											
Bobin	F	L	Q	ESR	$\theta$ (°)	C	D	R	X	Z	DCR
İç içe ters Bobin	1 kHz	8,2 $\mu$ H	0,0462	1,1130 $\Omega$	2,6410°	-	-	1,1128 $\Omega$	0,0515 $\Omega$	1,1141 $\Omega$	1,1158 $\Omega$
İç içe ters Bobin	10 kHz	8,13 $\mu$ H	0,4590	1,1129 $\Omega$	24,653°	-	1,7864	1,1290 $\Omega$	0,5107 $\Omega$	1,2245 $\Omega$	1,1161 $\Omega$
İç içe ters Bobin	100 kHz	8,136 $\mu$ H	4,6074	1,1096 $\Omega$	77,739°	-	0,1780	1,1095 $\Omega$	5,1120 $\Omega$	5,2310 $\Omega$	1,1163 $\Omega$
Dairesel merkezli Bobin	100 Hz	1 $\mu$ H	-	- $\Omega$	179,80°	-	-	-0,164 $\Omega$	0,0004 $\Omega$	0,1674 $\Omega$	0,9671 $\Omega$
Dairesel merkezli Bobin	120 Hz	9 $\mu$ H	0,0074	0,94722 $\Omega$	0,4300°	-	-	0,9471 $\Omega$	0,0070 $\Omega$	0,9472 $\Omega$	0,9505 $\Omega$
Dairesel merkezli Bobin	1 kHz	8,9 $\mu$ H	0,0591	0,95628 $\Omega$	3,3712°	-	-	0,9465 $\Omega$	0,0560 $\Omega$	0,9512 $\Omega$	0,9508 $\Omega$
Dairesel merkezli Bobin	10 kHz	8,86 $\mu$ H	0,5853	0,94925 $\Omega$	30,371°	-	1,3992	0,9494 $\Omega$	0,5563 $\Omega$	1,1004 $\Omega$	0,9497 $\Omega$
Dairesel merkezli Bobin	100 kHz	8,678 $\mu$ H	5,3490	1,0193 $\Omega$	79,411°	-	0,1533	1,0191 $\Omega$	5,4523 $\Omega$	5,5470 $\Omega$	0,9509 $\Omega$
Sarmal Bobin	100 Hz	-	52,250	-	-88,26°	12 pF	0,0175	3,1452 $\Omega$	-	-	-
Sarmal Bobin	120 Hz	-	89,247	-	-89,47°	13 pF	0,0138	1,2871 M $\Omega$	-	99,617 M $\Omega$	-
Sarmal Bobin	1 kHz	-	70,514	-	-89,20°	12,9 pF	0,0117	172,48 k $\Omega$	-	12,357 M $\Omega$	-
Sarmal Bobin	10 kHz	-	95,886	-	-89,39°	12,44 pF	0,0086	13,129 k $\Omega$	-	1,2790 M $\Omega$	-
Sarmal Bobin	100 kHz	-	79,568	-	-89,28°	11,516 pF	0,0102	1,7060 k $\Omega$	-	138,20 k $\Omega$	-

Tablonun devamı											
Bobin	F	L	Q	ESR	$\theta$ (°)	C	D	R	X	Z	DCR
Parçalı Elektrot merkezli Bobin	100 Hz	-	0,1676	-	-9,408°	6 pF	5,0282	40,399 MΩ	-6,547 MΩ	40,799 MΩ	-
Parçalı Elektrot merkezli Bobin	120 Hz	-	0,2325	-	-13,26°	8 pF	3,5688	38,867 MΩ	-9,171 MΩ	39,956 MΩ	-
Parçalı Elektrot merkezli Bobin	1 kHz	-	1,7904	-	-60,57°	7,2 pF	0,4628	9,4822 MΩ	-16,83 MΩ	19,354 MΩ	-
Parçalı Elektrot merkezli Bobin	10 kHz	-	14,720	-	-86,13°	7,03 pF	0,0560	155,60 kΩ	-2,251 MΩ	2,2588 MΩ	-
Parçalı Elektrot merkezli Bobin	100 kHz	-	56,933	-	-88,99°	6,236 pF	0,0145	4,5615 kΩ	-255,1 kΩ	255,16 kΩ	-

Tablo 3.2’de sunulan ölçüm verileri incelendiğinde, her bir bobin geometrisinin kendine özgü avantajları olduğu görülmektedir. Örneğin, taraklı bobin yüksek  $Q$  değerleri ile öne çıkarken, iç içe bobin hem düşük ESR hem de stabil endüktans değişimi ile dikkat çekmiştir. Spiral ve sekizgen geometrilerde ise üretim toleranslarının ve parazitik kapasitans etkilerinin daha belirgin olduğu gözlenmiş, bu bobinlerin bazı frekanslarda daha düzensiz tepki verdikleri anlaşılmıştır. Bu durum, bobin tasarımının elektromanyetik davranış üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3.42. İki iç içe bobinin karşılıklı bağlanarak LCR metre ile test edilmesi



Şekil 3.43. İç içe bobin ve dairesel merkezli bobinin karşılıklı bağlanarak LCR metre ile test edilmesi



Şekil 3.44. İç içe bobin ve ters iç içe bobinin karşılıklı bağlanarak LCR metre ile test edilmesi

Şekil 3.42, Şekil 3.43 ve Şekil 3.44’de karşılıklı bağlanmış iki düzlemsel bobinin LCR ile test görselleri yer almaktadır. Şekil 3.42’deki konfigürasyonun en yüksek Q ve L değeri verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

### 3.4. Önerilen Algılama Sisteminin Tasarımı

Sistemin prototip aşamasında kullanılan test düzenekleri, genel algılama prensibini doğrulamak için faydalı olmakla birlikte, pratik uygulamalara entegrasyon açısından çeşitli sınırlılıklarını içermektedir. Önceki versiyonlarda, test ortamı çoğunlukla laboratuvar koşullarında hazırlanmış olup; bobinlerin sabitlenmesi, hortumun konumlandırılması, dış gürültülerden yalıtım sağlanması ve sistemin taşınabilirliği gibi temel ihtiyaçlara yönelik kalıcı çözümler sunulamamıştır. Ayrıca, cihazın yapısal bütünlüğü, kullanıcı etkileşimi, güç yönetimi ve arayüz desteği açısından da eksiklikler mevcuttu.

Bu gereksinimlerden yola çıkılarak, sistemin hem medikal hem de endüstriyel uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilmesini sağlayacak şekilde kompakt ve çok yönlü bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Prototipleme sürecinde bazı parçalar 3B yazıcı ile PLA filament kullanılarak fiziksel olarak üretilmiş ve sistemi nihai haline getirilmiştir. Yaklaşık 11 cm × 7 cm yüzey alanına ve 8 cm boyuna sahip olan kutu yapısı sayesinde cihaz, hem taşıma kolaylığı sunmakta hem de tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan serum hortumlarına doğrudan entegre olabilecek biçimde kompaktlaştırılmıştır. Tasarlanan bu sistemin üretilmiş görselleri Şekil 3.45’de gösterilmektedir.

Tasarımda yer alan klipsli sabitleme mekanizması, hortumun sistem içerisine güvenli şekilde yerleştirilmesini sağlarken; manyetik konnektörlerle çalışan açılır-kapanır yapı, kullanıcıya hızlı montaj ve sökme imkanı tanımaktadır. Bu yapı sayesinde hortum, cihazın merkezinde yer alan algılama bölgesine hizalanarak düzgün biçimde geçmekte ve sensörlerin algılama doğruluğu artırılmaktadır.

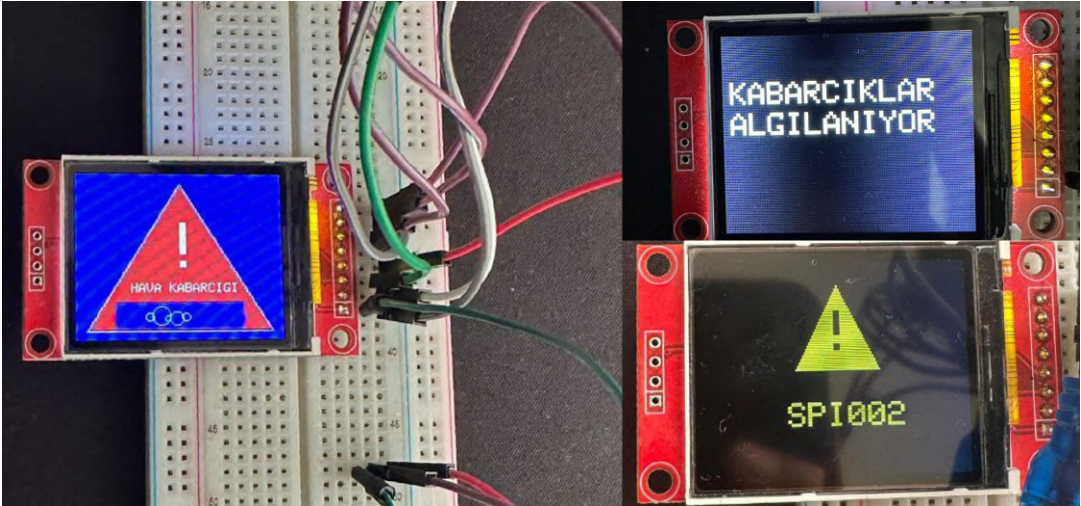
Şekil 3.45’deki 3D yazıcıdan basılan kutunun iç yüzeyi, elektromanyetik girişimlerden korunmak amacıyla Faraday kafesi etkisi oluşturacak biçimde özel bir kaplama ile yalıtılmıştır. Bu sayede, dış ortamdaki gelebilecek yüksek frekanslı parazitlerin sistem üzerindeki etkisi azaltılmış ve algılama güvenilirliği artırılmıştır. Ayrıca, cihaz bünyesinde yer alan özgün veri işleme, mikrodenetleyici ve haberleşme devreleri tek bir kompakt gövde içerisinde toplanmıştır. STM32 tabanlı mikrodenetleyici



**Şekil 3.45.** Sistem bileşenlerinin entegre edilmiş nihai cihaz prototipi

ve ESP modülü sayesinde, sistem hem gerçek zamanlı kontrol hem de kablosuz iletişim yetenekleri kazanmıştır.

Geliştirilen sistemin kullanıcı etkileşimi de sade ve anlaşılır bir arayüzle desteklenmiştir. Şekil 3.46’da sistemde kullanılan ekran arayüzü gösterilmiştir. Cihaz üzerinde yer alan ekran aracılığıyla hava kabarcığı ya da metal partikül tespiti anlık olarak izlenebilmekte; ayrıca sistem kullanıcıya görsel uyarılarla geri bildirim sağlamaktadır. Tüm bu özellikler, cihazı anlaşılabilir hâle getirmektedir. Cihazın çalışması tek bir buton ile başlatılmakta ve yine aynı şekilde sonlandırılabilen, bu da kullanım kolaylığını artıran önemli bir unsurdur.



**Şekil 3.46.** Cihaz üzerinde çalışacak olan ekranın arayüz çalışmaları

Sistemin yazılım altyapısı, yalnızca yerel kullanım değil, aynı zamanda uzaktan güncelleme ve müdahale edilebilirlik hedefiyle de tasarlanmıştır. Kablosuz bağlantı sayesinde yazılımsal arızalar uzaktan kontrol edilebilmekte, gerektiğinde sistem yazılımı

güncellenerek cihazın yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliği sağlanabilmektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen bütünsel tasarım; yüksek algılama doğruluğu, taşınabilirlik, düşük maliyet, kullanım kolaylığı ve elektromanyetik uyumluluk gibi temel tasarım hedeflerini başarıyla yerine getirmiştir. Sistem, hem medikal ortamlarda intravenöz sıvı hatlarının izlenmesinde hem de endüstriyel sıvı devrelerinde hava kabarcığı ve metal partikül algılama amacıyla etkin biçimde kullanılacak bir düzeye erişmiştir.

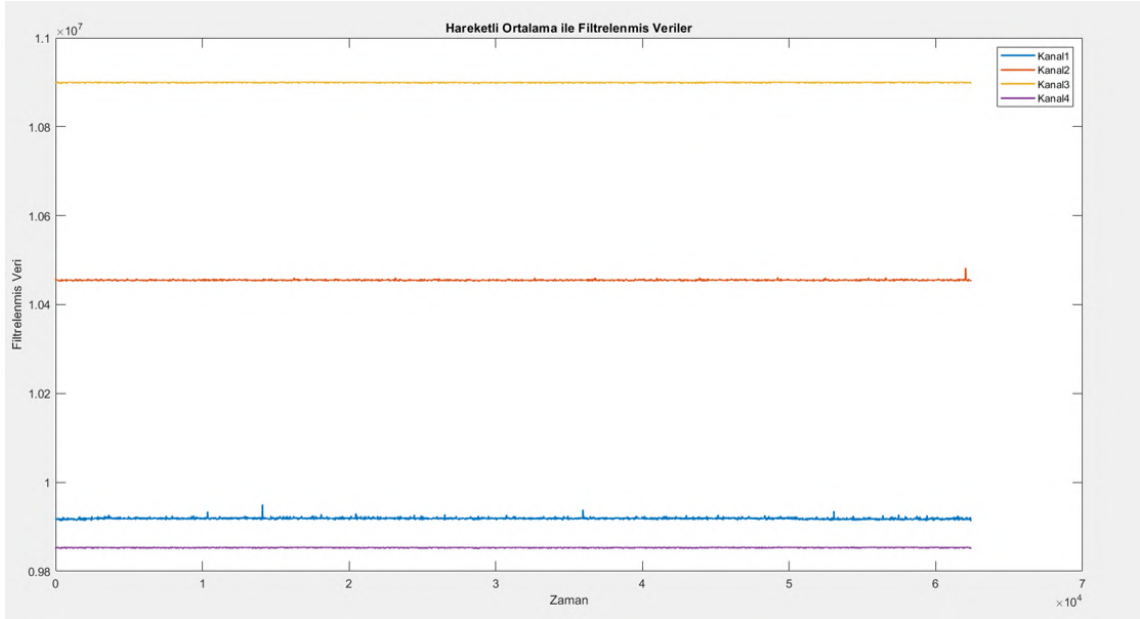
## 4. SONUÇLAR, BULGULAR VE ÖNERİLER

### 4.1. Sonuçlar

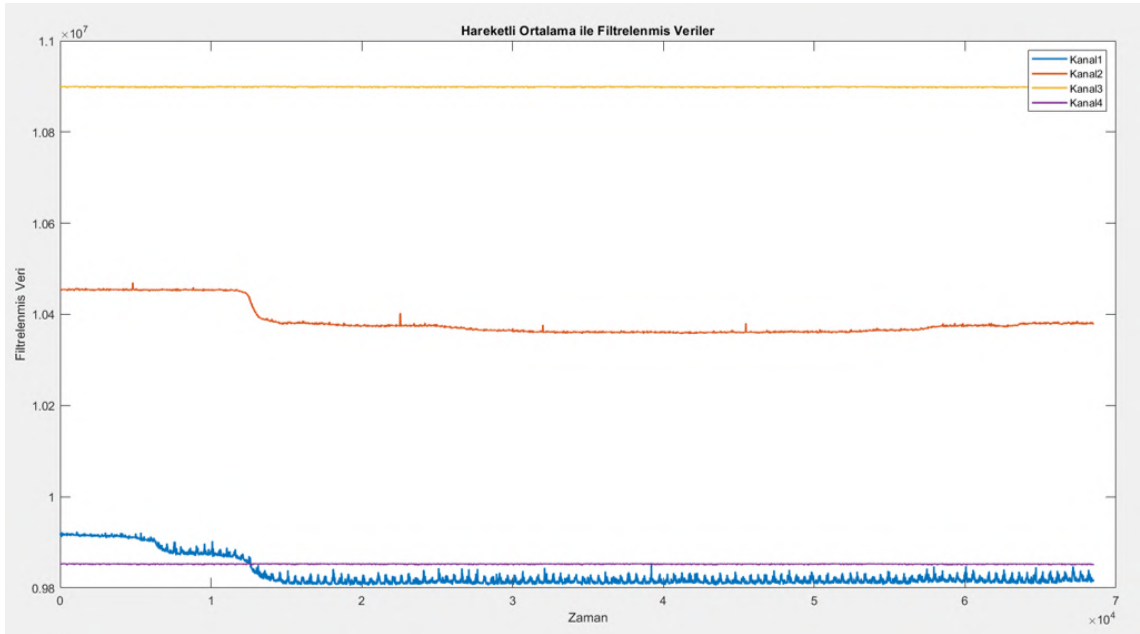
Bu çalışmada geliştirilen manyetik algılama temelli sensör sistemi, medikal sıvılarda hava kabarcığı, endüstriyel sıvı hatlarında metal partiküllerin tespiti amacıyla uygulanmıştır. Gerçek zamanlı veri elde etmek için STM Studio yazılımı kullanılmış, bu veriler MATLAB ortamında işlenerek analiz edilmiştir. Verilerin işlenmesi sürecinde yüksek geçiren ve düşük geçiren filtreler uygulanarak frekans bileşenleri ayrıştırılmış; böylece kabarcık geçişlerinin oluşturduğu karakteristik değişimler daha belirgin hale getirilmiştir. Bu sayede, sistemin hava kabarcıkları ve metal partiküllere karşı hassasiyetinin artırıldığı gözlemlenmiştir.

Başlangıç aşamasında, laboratuvar ortamında manuel olarak üretilen algılama sistemi Şekil 3.23'de sunulmaktadır. Prototipleme ve saha testleri sonrasında elde edilen veriler doğrultusunda, daha ileri üretim teknikleri kullanılarak Şekil 3.35'de gösterilen daha profesyonel bir algılama sistemi geliştirilmiştir. Bu gelişmiş sistemde kullanılan FDD, aynı anda dört farklı kanaldan ölçüm yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu çok kanallı yapı sayesinde, sıvı akış hatlarının farklı noktalarındaki algılama işlemleri eş zamanlı olarak gerçekleştirilebilmekte, böylece hava kabarcığı veya metal partikül geçişlerinin daha kapsamlı ve kontrollü bir şekilde izlenmesi mümkün hale gelmektedir. Şekil 4.1a'de ki grafik herhangi bir sıvı geçişi olmaksızın sistemin tepkisini göstermektedir. Sistemin temel çalışma koşulları bu şekilde doğrulandıktan sonra, test hattına intravenöz sıvı enjekte edilerek başlangıçta hava ile dolu olan boru hattı sıvı ile doldurulmuştur. Bu geçiş süreci boyunca elde edilen veriler Şekil 4.1b'de sunulmuştur. İlgili grafik incelendiğinde, sıvı geçişi esnasında sensör çıkışlarında belirgin değişimler meydana geldiği ve bu değişimlerin özellikle sıvı-hava faz farkından kaynaklandığı açıkça görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin hava-sıvı ayrımını yüksek duyarlılıkla algılayabildiğini ve gerçek zamanlı izleme açısından işlevsel bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.2'de, intravenöz (IV) sıvı hattı içerisinde yaklaşık 4 mm (yaklaşık

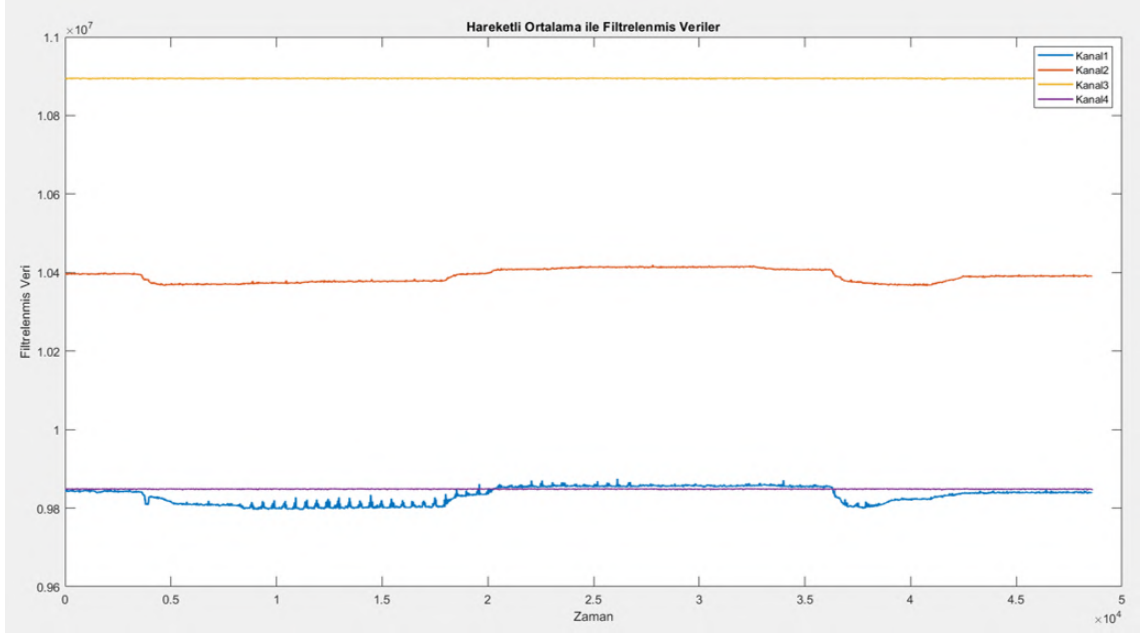


(a) Sensör üzerinden herhangi bir hava kabarcığı geçmeden oluşturulan grafik görüntüsü



(b) Sensör üzerinden sıvı geçişini gösteren grafik

**Şekil 4.1.** Sensör üzerinden elde edilen hava kabarcığı geçişi öncesi ve sıvı geçişi sonrası grafik görüntüleri.

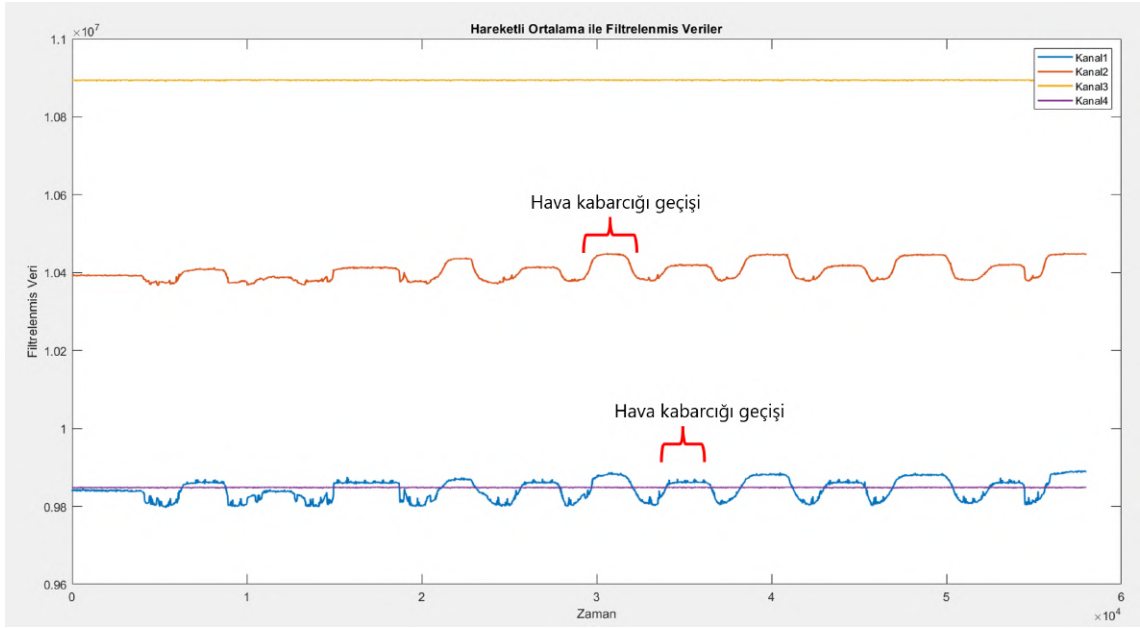


**Şekil 4.2.** IV hattı içerisinde oluşturulan 4 mm boyundaki hava kabarcığının, bobin üzerinden yavaşça ilerlemesi sırasında elde edilen filtrelenmiş veri grafiği

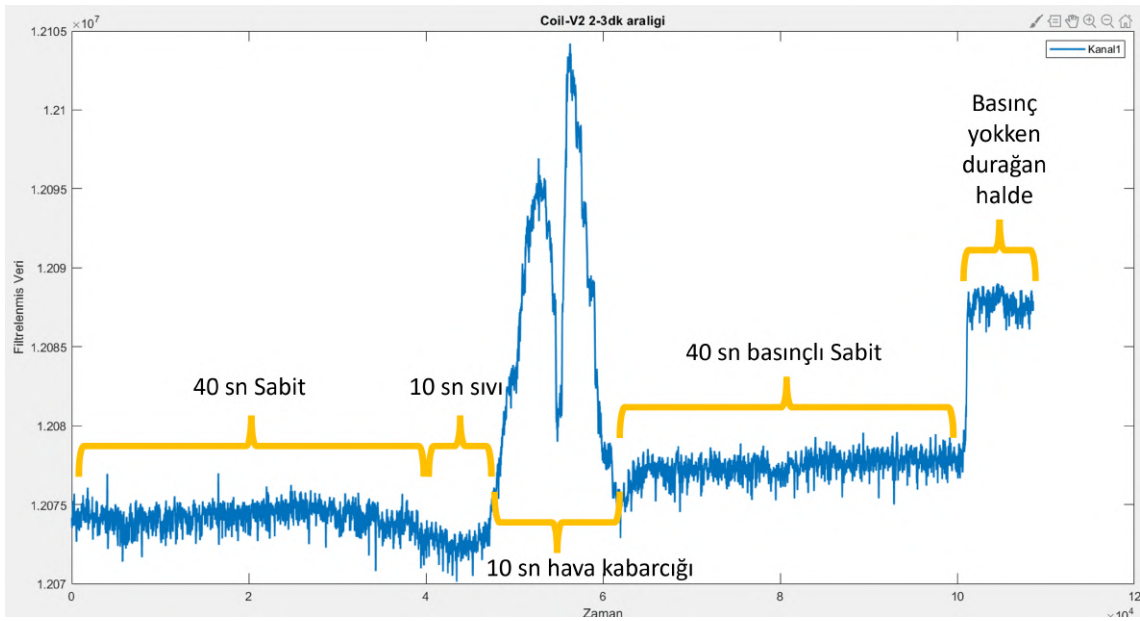
28, 27 mm<sup>3</sup>) uzunluğunda bir hava kabarcığı oluşturulmuş ve bu kabarcık, sensör bobini (coil) üzerinden yaklaşık 60 saniyelik bir sürede yavaşça ilerletilmiştir. Bu süreçte yalnızca Kanal 1 ve Kanal 2'den alınan veriler hareketli ortalama filtresi ile işlenerek grafik haline getirilmiştir. Grafik incelendiğinde, her iki kanalda da belirgin sinyal değişimleri gözlenmiş, özellikle kabarcığın bobin merkezinden geçişi sırasında algılamanın daha duyarlı hale geldiği fark edilmiştir.

Şekil 4.3'te gösterilen deneysel senaryoda, IV sıvı hattı içerisinde oluşturulan hava kabarcığı, sensör bobini boyunca ileri-geri yönlü hareket ettirilmiştir. Toplam 60 saniyelik test süresinde, bobinin bir ucundan diğer ucuna doğru hava kabarcığı sürekli ileri geri hareketi tekrarlanmıştır. Bu süreçte yalnızca Kanal 1 ve Kanal 2 verileri toplanmış ve hareketli ortalama filtresi uygulanarak analiz edilmiştir. Grafik incelendiğinde, her iki kanalda da kabarcığın bobin alanına giriş ve çıkış anlarında tekrarlayan sinyal artışları açıkça gözlemlenmiştir.

Şekil 4.4'te gösterilen deneysel senaryo, sırasıyla sabit sıvı ortamı, sıvı enjeksiyonu, hava kabarcığı geçişi, basınçlı sabit sıvı ortamı ve basınçsız bekleme durumlarını içeren çok aşamalı bir test dizisini kapsamaktadır. İlk 40 saniyelik zaman aralığında sistem sabit bir sıvı ortamında stabilize edilmiştir. Ardından 10 saniyelik bir

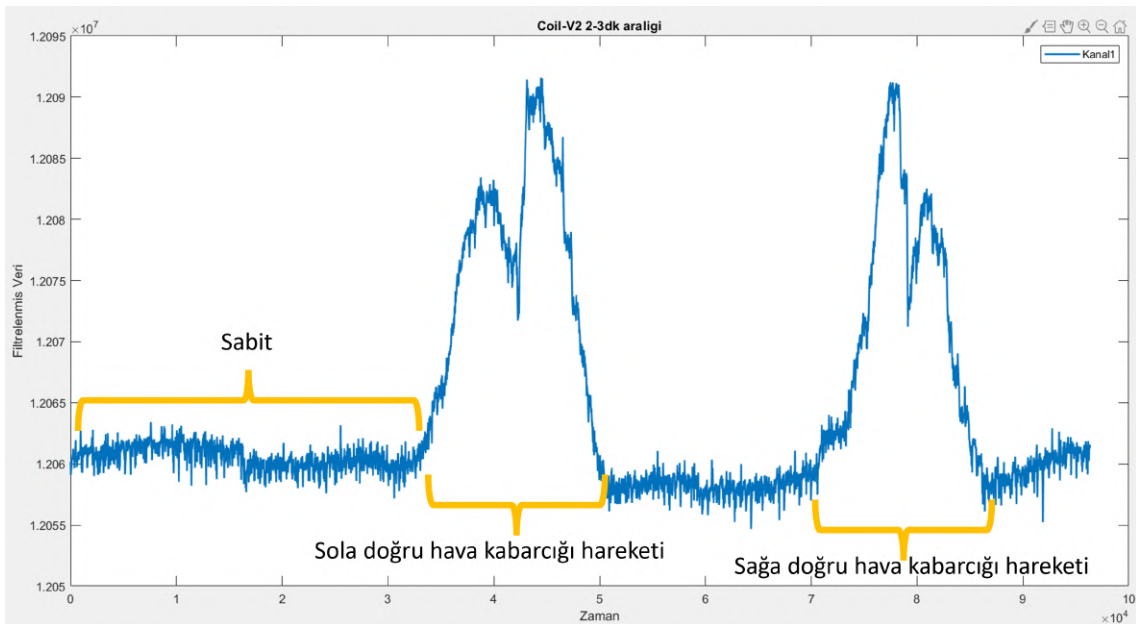


**Şekil 4.3.** Sensör bobini üzerinde oluşturulan hava kabarcığının ileri-geri yönlü hareketi sırasında oluşan grafik



**Şekil 4.4.** Hava kabarcığı geçişi sırasında oluşan grafik

sıvı enjeksiyonu uygulanmış, bunu takiben 10 saniye boyunca 4 mm (yaklaşık  $28,27 \text{ mm}^3$ ) uzunluğunda hava kabarcığı bobin üzerinden geçirilmiştir. Grafik verilerine göre bu süre zarfında sensör çıkışında belirgin bir tepe yapısı oluşmuş ve hava kabarcığının bobin üzerindeki etkisi açıkça gözlenmiştir. Hemen sonrasında sistem, yaklaşık 40 saniye boyunca sıvı sıkıştırılarak basınç uygulanmıştır. Ardından basınçsız ve durağan bir bekleme evresine geçilmiştir. Bu çok aşamalı test, sensörün hem sıvı-hava geçişlerine hem de basınç değişimlerine karşı oldukça duyarlı ve kararlı çalıştığını göstermektedir. Özellikle hava kabarcığının oluşturduğu sivri sinyal tepkisi, sistemin kabarcık tespiti için yeterli hassasiyete sahip olduğunu doğrulamaktadır.

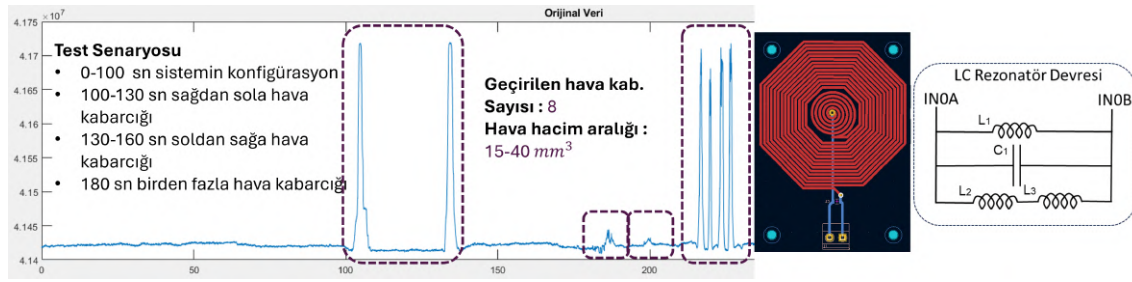


**Şekil 4.5.** Hava kabarcığı geçişi sırasında manyetik sensörden elde edilen sinyal değişimi

Şekil 4.5’de, manyetik sıvı akış-hava kabarcığı sensörünün test ortamında gerçekleştirilen deneysel ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Deneyde, sensör prototipi üzerinden elde edilen sinyal verileri analiz edilmiş ve hava kabarcığı geçişi sırasında sinyalde oluşan değişimler grafiksel olarak sunulmuştur. Grafikte oluşan hava kabarcığı tespiti, rezonans frekansında meydana gelen kaymalar sonucunda tespit edilmiştir.

Hava kabarcığını daha hassas algılayabilmek amacıyla en uygun bobin tasarımını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, endüktans ve Q faktörünü artırmak üzere tasarlanan bobinler teorik olarak modellenmiş, LCR metre ile ölçülerek doğrulanmış ve gerçekleştirilen testlerle kanıtlanmıştır. Bir sonraki bölümde bu testlerin

ayrıntıları sunulacaktır.

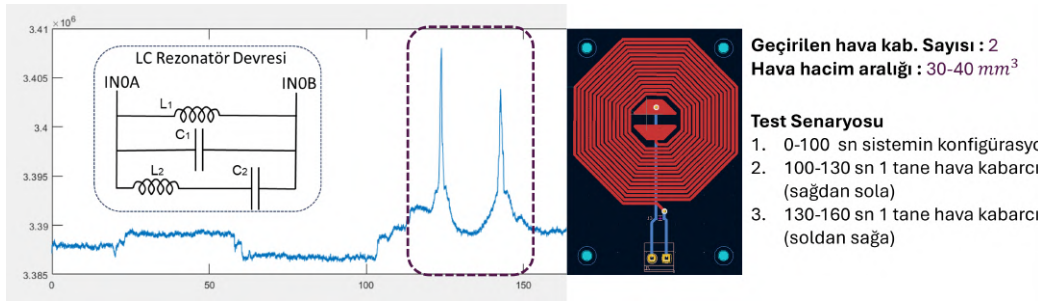


Şekil 4.6. Ters yönlü iç içe bobinin test sırasında elde edilen grafiği

Şekil 4.6’de ters yönlü iç içe bobinle yapılan performans testi özetlenmiştir. Önceki ölçümlerde bobinin indüktansı 8–9  $\mu\text{H}$  arasında bulunmuş ve bu değer, Texas Instruments WEBENCH® tasarım aracında elde edilen kuramsal sonuçlarla örtüşmüştür. Ölçülen Q faktörü yaklaşık 4–5 olarak çıkmış, ancak kuramsal hesaplamalar 120–200 aralığında Q beklemiştir. Bu fark, LCR metrenin en fazla 100 kHz’de ölçüm yapmasından kaynaklanmaktadır; rezonans frekansı daha yüksek olduğundan gerçek Q değeri ölçülen frekansta düşük görünmektedir. Aynı nedenle 100 kHz’te görülen 24° faz kaymasının, rezonans noktasında daha yüksek olacağı öngörülmüştür.

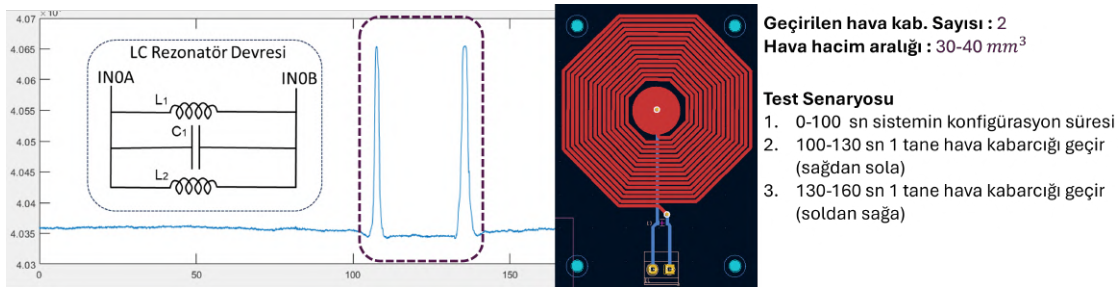
Test senaryosunda 0–100 s aralığında hava kabarcığı geçirilmemiş, bu veri kalibrasyon verisi olarak kullanılmıştır. Ardından 100–160 s aralığında yaklaşık 35–40  $\text{mm}^3$  hacminde tek bir hava kabarcığı kontrollü bobin üzerinden geçirilmiş ve sinyalde belirgin bir değişim gözlenmiştir. 180 sn sonrasında rastgele üretilen kabarcıklar bobin üzerinden geçirilmiştir. Bazı büyük kabarcıkların parçalanmasıyla yaklaşık 15–20  $\text{mm}^3$  hacimli küçük hava kabarcıklarının geçişi olmuştur. Bu geçişler Şekil 4.6’de kutu içine alınmıştır. Elde edilen bulgular, ters yönlü iç içe bobinin hava kabarcığı algılama potansiyelini doğrulamıştır.

Şekil 4.7’de, parçalı elektrot merkezli bobinin hava kabarcığı geçişi sırasında kaydedilen sinyal değişimleri gösterilmiştir. Oluşturulan eşdeğer devre incelendiğinde, osilatörün kararlı çalışması için sabit L ve C elemanları belirlenmiş; bobinin manyetik davranışını temsil eden değişken L ve kapasitif karakterini temsil eden C devreye eklenmiştir. Karşılıklı iki metal plaka ile oluşturulan C sayesinde kapasitif algılama da yapılabilmektedir. LCR metre ile yapılan testlerde kapasitif olarak 6-7 pF aralığında kapasitans olduğu test edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde, yaklaşık 35–40  $\text{mm}^3$



**Şekil 4.7.** Parçalı elektrot merkezli bobinin test sırasında elde edilen grafiği

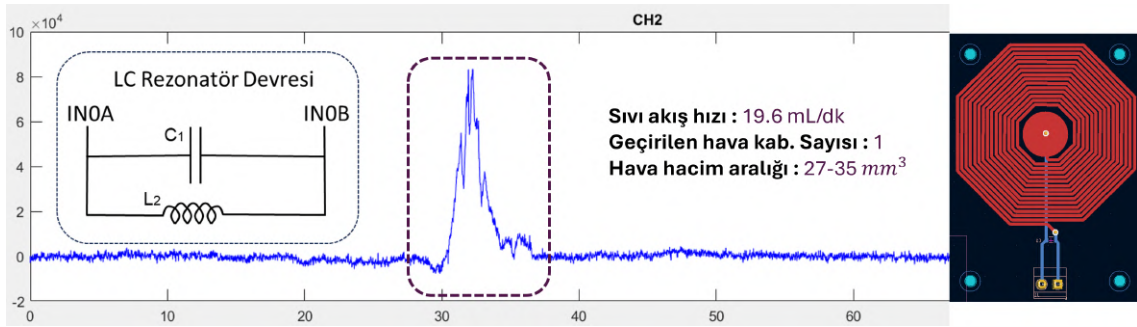
hacmindeki büyük hava kabarcıklarının frekansta ölçülebilir bir kayma oluşturduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık, 1–20 mm<sup>3</sup> aralığındaki küçük kabarcıkların sinyal üzerindeki etkisi sınırlı kalmış ve bu hacim aralığında algılama hassasiyetinin düşük olduğu tespit edilmiştir.



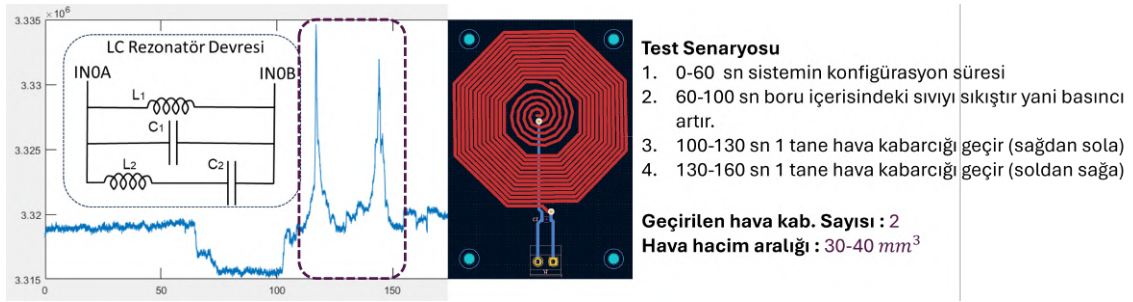
**Şekil 4.8.** Dairesel merkezli bobinin test sırasında elde edilen grafiği

Şekil 4.9 ve Şekil 4.8’de, dairesel merkezli bobin tasarımıyla yapılan deneysel ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu tasarımda manyetik alanın bobin merkezinde yoğunlaştırılması hedeflenmiş ve böylece hava kabarcığı algılama hassasiyetinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. LCR metre ile gerçekleştirilen ölçümlerde, bobinin 100 kHz’de yaklaşık 8–9 µH indüktans ve 5–6 aralığında Q faktörü oluşturduğu görülmüştür. Ölçümde kaydedilen yaklaşık 80° faz farkı da devrenin indüktif karakterini doğrulamaktadır. Deney sırasında büyük hacimli hava kabarcıkları kontrollü olarak akış hattından geçirilmiş; elde edilen veriler, dairesel merkezli bobinin ölçüm hassasiyetinin yüksek olduğunu ve uygulama açısından uygun bir seçenek sunduğunu göstermiştir.

Şekil 4.10 incelendiğinde, sarmal merkezli bobin tasarımının ortasında hem kapasitif ( 10 pF) hem de indüktif özellik kazandıran iç içe bir sarmal yerleştirildiği görülmüştür. Bu düzenlemeyle manyetik alanın bobin merkezinde yoğunlaştırılması

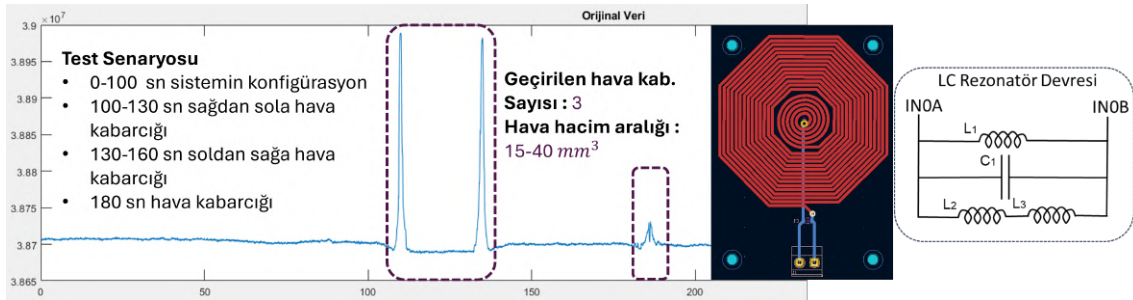


**Şekil 4.9.** Dairesel merkezli bobinin üzerinde hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği



**Şekil 4.10.** Sarmal merkezli bobin yapısında hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

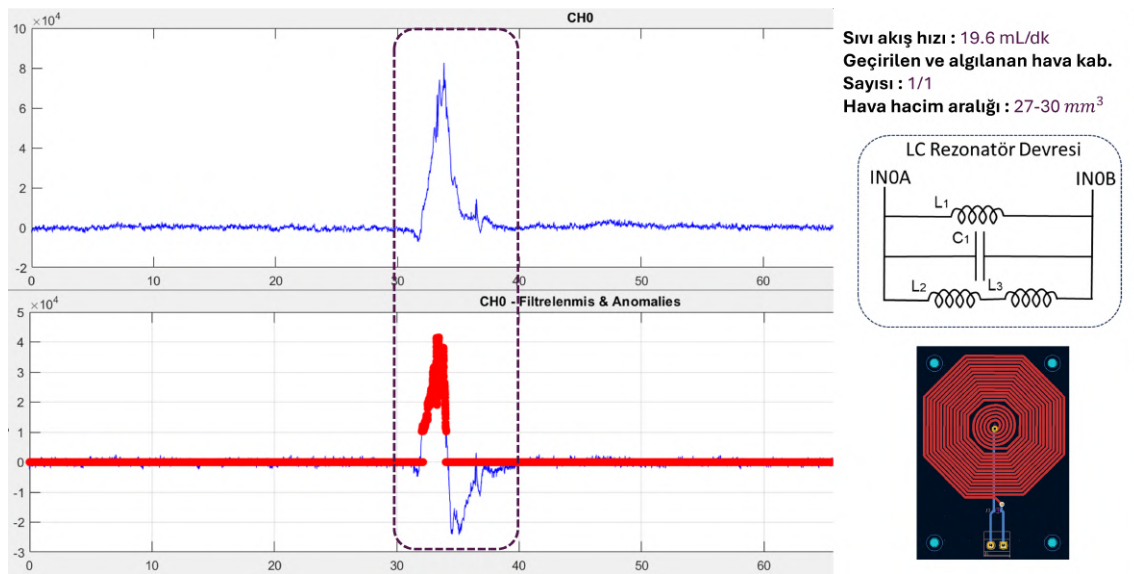
amaçlanmıştır; ancak gürültüde artış da olmaktadır. Buna rağmen yapılan ölçümler, sarmal merkezli yapının hava kabarcığı algılamada tatmin edici bir hassasiyet sunduğunu ve potansiyel olarak değerlendirilebilecek bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur.



**Şekil 4.11.** İç içe seri yapılu bobinin üzerinden hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

Şekil 4.11 iç içe seri bobin tasarımına ait test sonuçlarını göstermektedir. Bu yapı, manyetik alanı yoğunlaştırarak hava kabarcıklarına karşı daha yüksek algılama hassasiyeti elde etmek amacıyla geliştirilmiştir. LCR ölçümlerinde bobinin 9–10  $\mu\text{H}$  indüktans ve yaklaşık  $80^\circ$  pozitif faz farkı ürettiği görülmüş; böylece devrenin bütünüyle endüktif karakterde çalıştığı doğrulanmıştır. Testlerde büyük hacimli kabarcıklar

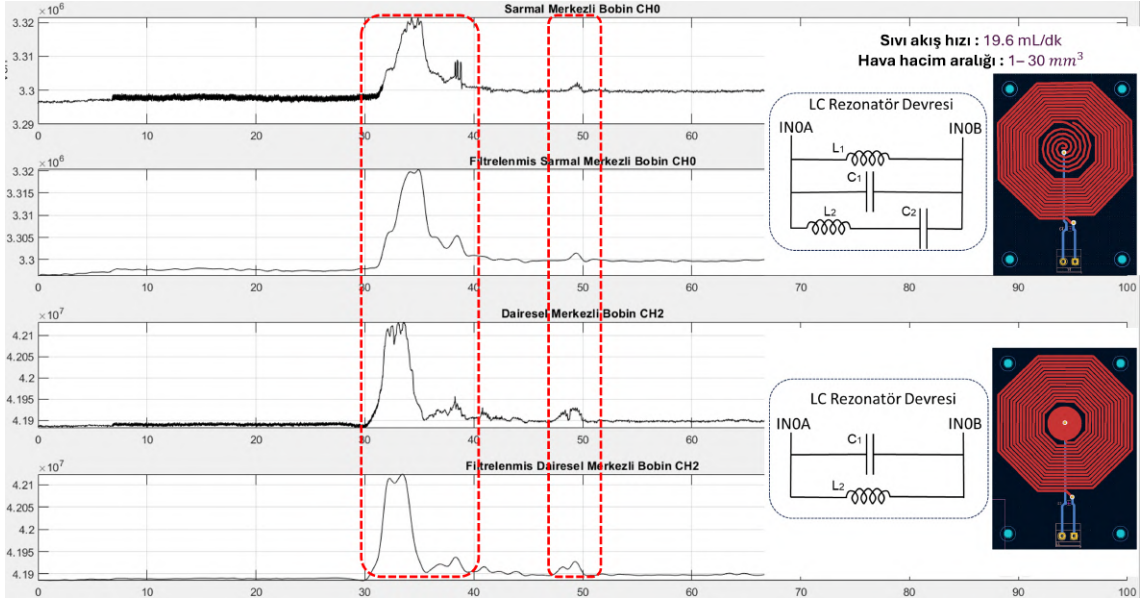
güvenilir biçimde algılanmış, küçük kabarcıklarda ise rezonans frekansında oluşan değişimler kaydedilmiştir. Tasarım, yüksek L ve Q faktörlerine ulaşırken, düşük dissipation faktörü (D) sayesinde enerji kayıplarını sınırlamayı hedeflemiştir. Bobinler arasındaki manyetik alan etkileşiminin artırılması, kabarcık geçişlerinde rezonans kaymasının daha belirgin hâle gelmesini sağlamış ve böylece hem algılama hem de kabarcık boyutu tahmini kolaylaşmıştır. Bu nedenlerle, iç içe seri bobin yapısı hassas ölçümler için uygun bir aday olarak değerlendirilmiştir.



**Şekil 4.12.** İç içe seri yapılı bobin tasarımı ile hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

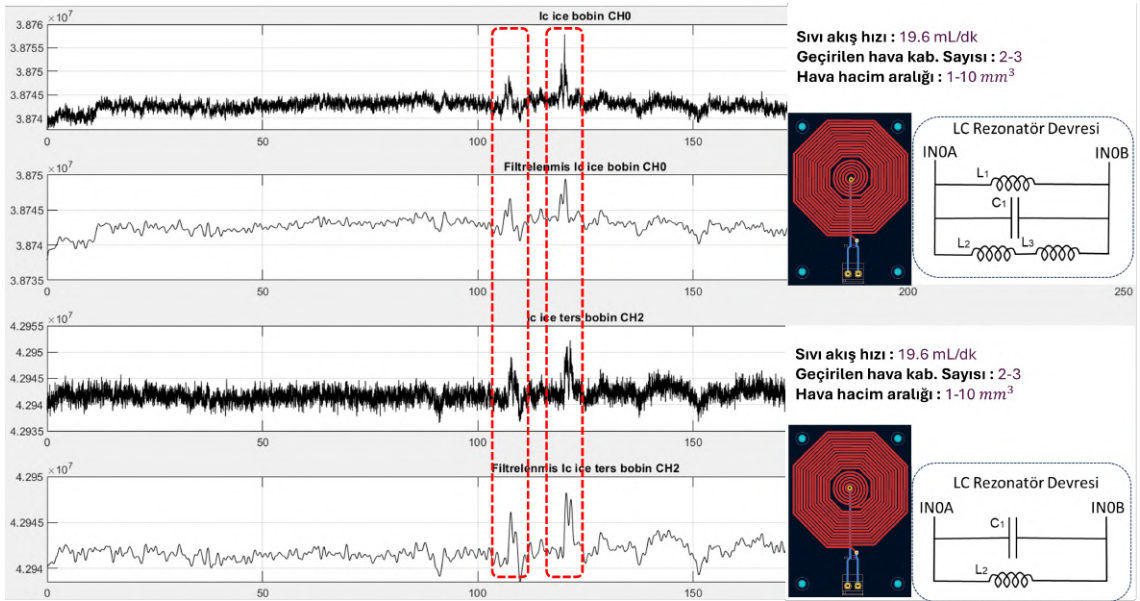
Şekil 4.12’de iç içe seri bobin üzerine yapılan testin sonuçları verilmiştir. Deneyde bobin üzerinden 27–30 mm<sup>3</sup> hacminde hava kabarcıkları geçirilmiş ve grafikte bu kabarcıkların sinyalde net bir değişime yol açtığı görülmüştür. Aynı veri seti, geliştirilen hava kabarcığı tespit algoritması ile de denenmiş; algoritmanın bu bobinle 27 mm<sup>3</sup>’ün üzerindeki kabarcıkları sorunsuz biçimde algıladığı doğrulanmıştır.

Şekil 4.13’de sunulan veriler, sarmal (spiral) ve dairesel merkezli bobinlerin aynı akış hızında ve aynı sıcaklık koşullarında test edilmesiyle elde edilmiştir. Yaklaşık 30 mm<sup>3</sup> hacimli büyük hava kabarcığı 30–40 s aralığında bobinlerden geçirildiğinde her iki tasarım da benzer büyüklükte frekans kayması üretmiş ve kabarcık açık biçimde algılanmıştır. 45–50 s aralığında yaklaşık 5–10 mm<sup>3</sup> orta boy kabarcık test edildiğinde, dairesel merkezli bobinin sinyal genliği spiral bobine göre belirgin biçimde daha yüksek çıkmıştır. Deneyin



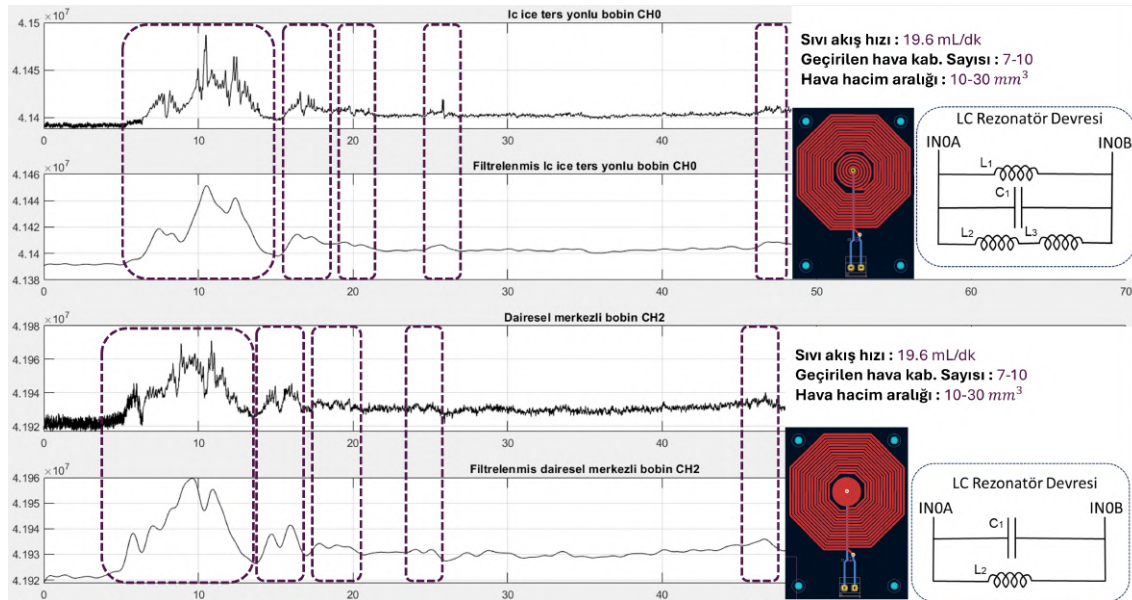
Şekil 4.13. Sarmal bobin ve dairesel merkezli bobinin aynı test üzerinde oluşan grafiği

60–70 s segmentinde yaklaşık 1–3 mm<sup>3</sup> hacimli çok küçük kabarcıklar akış hattından geçirilmiş; bu durumda sarmal bobinde ölçülebilir bir değişim görülmezken dairesel bobin düşük genlikli de olsa net bir titreşim üretmiştir. Bu bulgular, dairesel merkezli tasarımın özellikle küçük hacimli kabarcıkların tespitinde daha duyarlı olduğunu ve hassas algılamaya uygulamaları için spiral bobine kıyasla daha elverişli bir seçenek sunduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14. Ters yönlü iç içe bobin ile iç içe seri bobinin aynı test ortamında eş zamanlı olarak kullanıldığı yapıda, hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

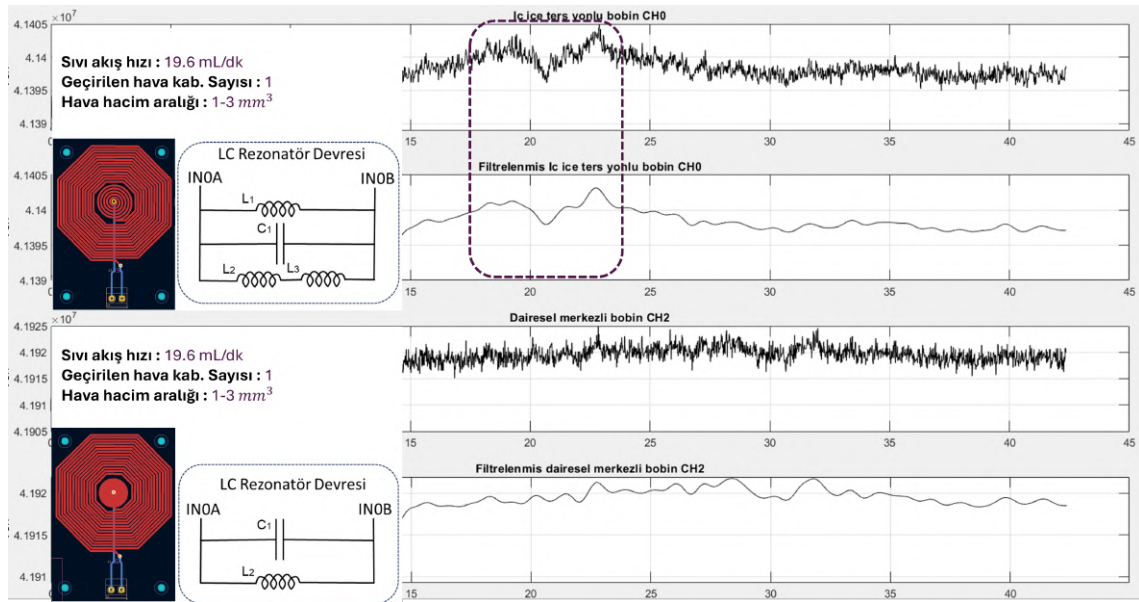
Şekil 4.14’de yer alan test düzeninde, iç içe seri yapıları bobin Ch0 kanalına bağlanmıştır ve bu hatta kararlı bir salınım sağlamak amacıyla ek olarak sabit bir bobin kullanılmıştır. Ch2 kanalında ise ters yönlü iç içe bobin yer almakta olup bu kanalda sabit bir endüktans bulunmamaktadır. Test sırasında sıvı akış hızı 19.6 mL/dk olarak sabitlenmiş ve sistemden hacmi yaklaşık 3 mm<sup>3</sup> ile 10 mm<sup>3</sup> arasında değişen iki adet hava kabarcığı geçirilmiştir. Her iki bobin de bu kabarcıkları algılamada başarı göstermiştir. Ancak sinyal çıktıları incelendiğinde, Ch0 kanalındaki iç içe seri bobinin daha düşük gürültü etkisiyle çalıştığı ve daha kararlı sinyal verdiği gözlemlenmiştir. Hassasiyet değerlendirmesi, hava kabarcığının geçtiği anda oluşan sinyalin maksimum ve minimum değeri arasındaki farkın ölçülmesiyle yapılmış; bu yöntemle göre iç içe seri bobinin algılama performansının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.15.** Dairesel merkezli bobin ile iç içe ters yönlü bobinin aynı test ortamında birlikte değerlendirildiği durumda, hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

Şekil 4.15’de, iç içe ters yönlü bobin (CH0) ve dairesel merkezli bobin (CH2) aynı test ortamında değerlendirilmiştir. CH0 hattında sabit bir bobin desteği ile daha kararlı bir rezonans davranışı sağlanırken, CH2 kanalında yalnızca dairesel bobin kullanılmıştır. Her iki kanalda da 19.6 mL/dk akış hızında, 7 ila 10 adet arasında değişen ve hacmi yaklaşık 10–30 mm<sup>3</sup> aralığında olan hava kabarcıkları geçirilmiştir. Elde edilen sinyal grafikleri incelendiğinde, her iki bobin de kabarcıkları algılamada başarılı olmuştur. Ancak, ters yönlü iç içe bobin kullanılan CH0 kanalında daha az gürültülü tepkiler gözlenmiştir.

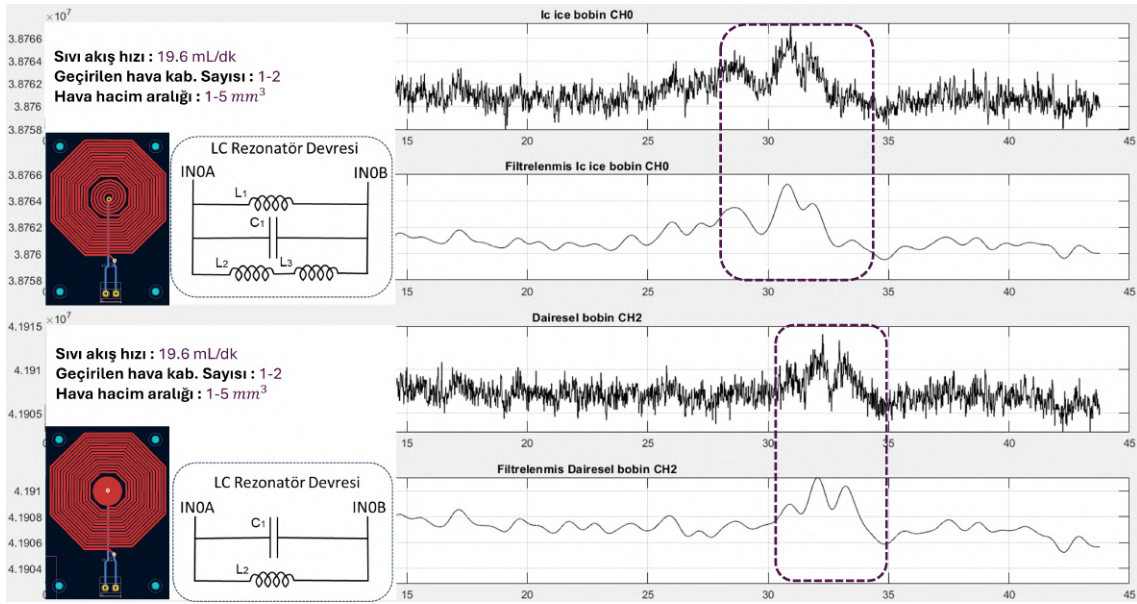
CH2’de ise bazı hava kabarcıklarında daha yüksek genlik olduğu gözlenmiştir.



**Şekil 4.16.** Dairesel merkezli bobin ile iç içe ters yönlü bobinin aynı test ortamında birlikte değerlendirildiği durumda, hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

Şekil 4.16’de gösterilen deney düzeneğinde dairesel merkezli bobin (CH2) ile iç içe ters yönlü bobin (CH0) aynı anda test edilmiştir. CH0 hattına sabit bir bobin eklenerek iç içe ters yönlü yapı oluşturulmuş, CH2 hattında ise yalnızca dairesel bobin kullanılmıştır. Akış hızı 19,6 mL/dk olarak ayarlanmış ve sisteme 1–3 mm<sup>3</sup> hacminde bir-iki hava kabarcığı verilmiştir. Ölçümler incelendiğinde, iç içe ters yönlü bobinde kutu içine alınan bölgede kabarcık geçişi kısmen ayırt edilebilmiş; buna karşılık dairesel bobinin sinyali, gürültü nedeniyle kabarcık etkisini belirginleştirememiştir. Bu sonuç, küçük hacimli kabarcıkların algılanmasında iç içe ters yönlü bobin yapısının dairesel merkezli bobine göre daha yüksek duyarlılık sağladığını göstermektedir.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ’teki deney düzeninde dairesel merkezli bobin Ch2 kanalına, iç içe seri bobin ise Ch0 kanalına bağlanmıştır. Aynı akış koşulları altında her iki bobin üzerinden yaklaşık 1–3 mm<sup>3</sup> hacminde tek bir küçük hava kabarcığı geçirilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, dairesel merkezli bobinde gürültü seviyesinin kabarcık sinyalini maskelendiği, buna karşın iç içe seri bobinde kabarcığın sinyalde daha net ve ayırt edilebilir biçimde belirdiği görülmüştür. Dolayısıyla, küçük hacimli kabarcıkların algılanmasında iç içe seri bobin yapısının dairesel merkezli bobine

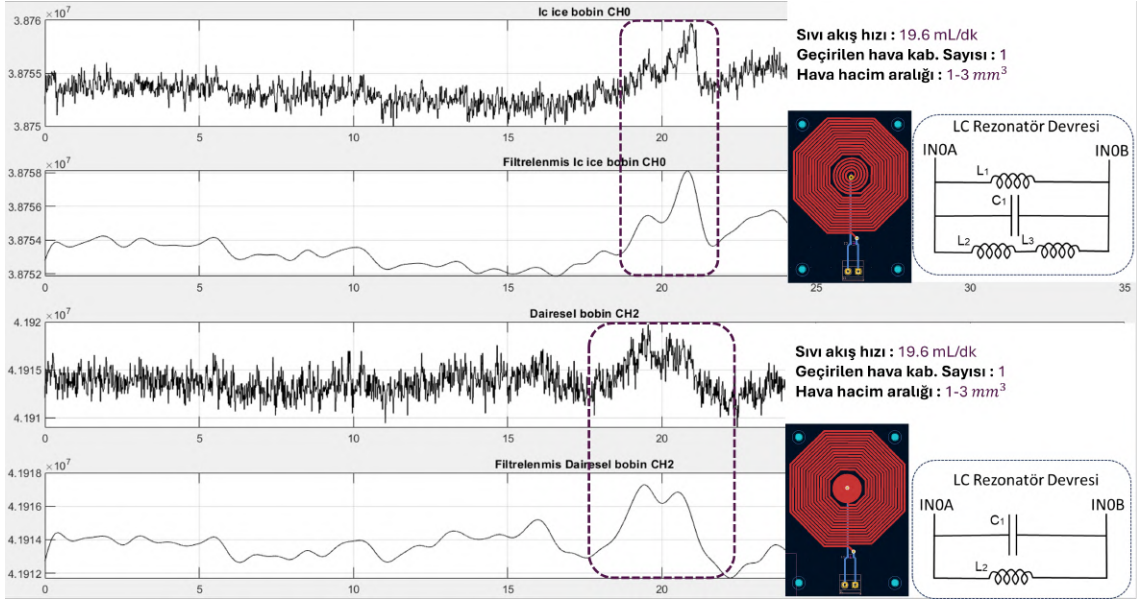


**Şekil 4.17.** Dairesel merkezli bobin ile iç içe seri bobinin aynı test ortamında birlikte değerlendirildiği durumda, hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

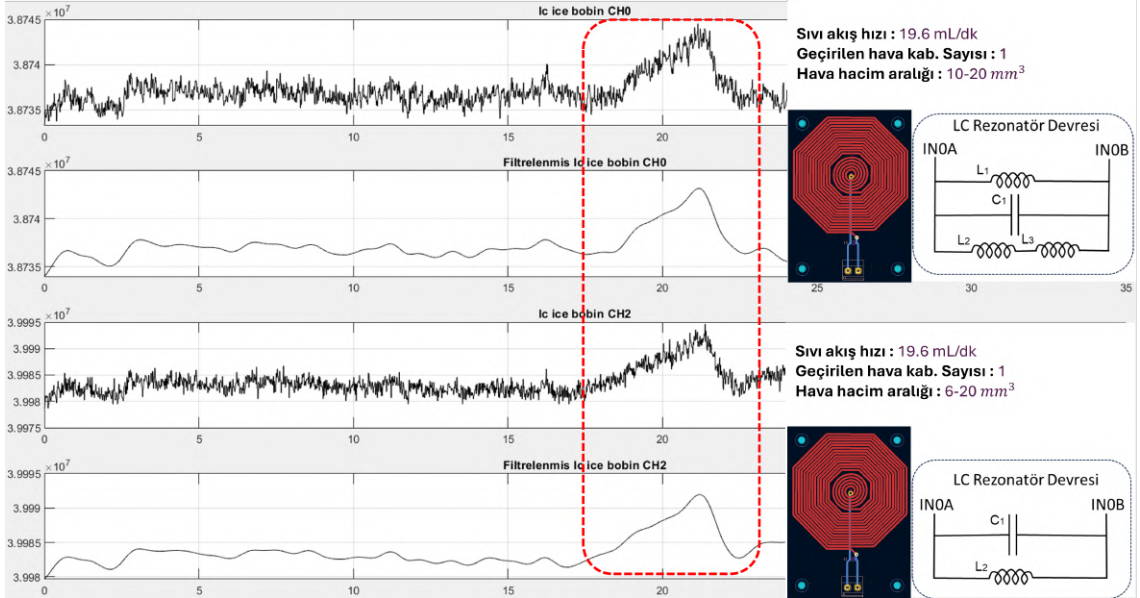
göre daha yüksek bir duyarlılık sağladığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.18’te, dairesel merkezli bobin (CH2) ile sabit bobin destekli iç içe seri bobinin (CH0) aynı akış koşullarında karşılaştırmalı ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Debi 19,6 mL/dk olarak sabit tutulmuş ve sisteme hacmi 5–15 mm<sup>3</sup> arasında değişen hava kabarcıkları verilmiştir. Her iki kanalda da kabarcık geçişleri sinyalde ayırt edilebilir olsa da CH2’deki dairesel bobin daha yüksek gürültü seviyesine maruz kalmıştır. Maksimum–minimum genlik farkı ve sinyal kararlılığı dikkate alındığında, iç içe seri bobin daha istikrarlı bir çıktı üretmiş ve algılama performansı açısından dairesel tasarıma göre üstünlük sağlamıştır.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’te, sabit bobinle desteklenmiş iç içe seri bobin (CH0) ile tek başına iç içe seri bobin (CH2) kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm sonuçları yer almaktadır. Akış hızı 19,6 mL dk<sup>-1</sup> değerinde sabit tutulmuş ve hatta hacmi 10–20 mm<sup>3</sup> arasında değişen birden fazla hava kabarcığı verilmiştir. CH0 kanalında, ek sabit bobinin yükselttiği  $Q$  faktörü sayesinde sinyal genliği kararlı kalmış ve kabarcık geçişlerinde yüksek tepe-taban farkları elde edilmiştir. CH2 kanalındaki tek bobinli yapı ise kabarcık girişine daha yavaş tepki vermiş ve sinyal eğimi daha düşük kalmıştır. Bu sonuçlar, sabit bobin eklemenin ölçüm hassasiyetini belirgin biçimde artırmasa da sinyal kararlılığını

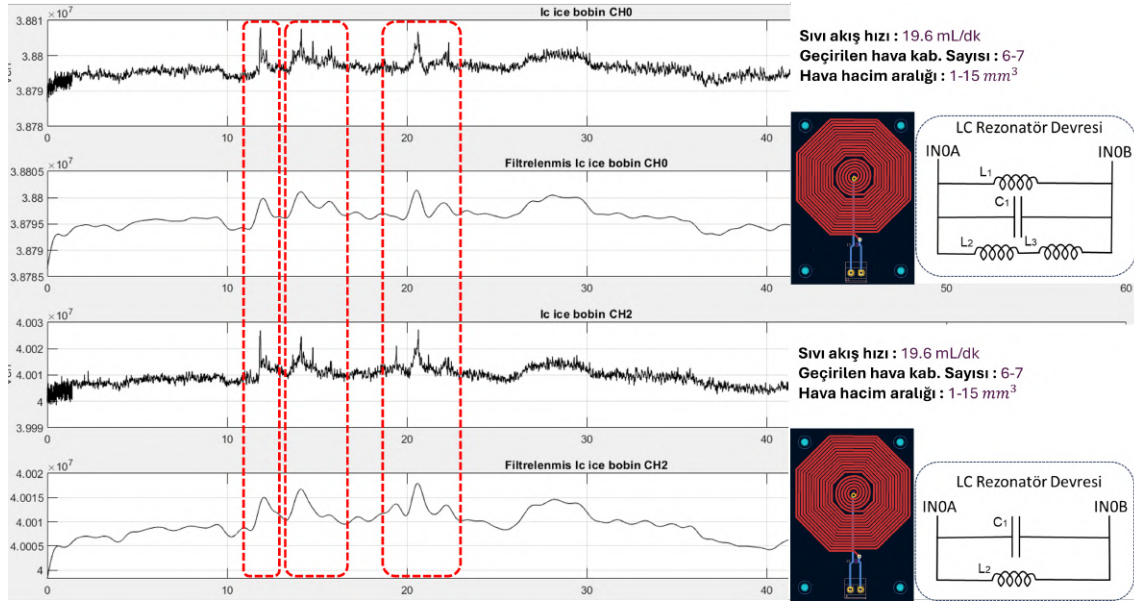


**Şekil 4.18.** Dairesel merkezli bobin ile iç içe seri bobinin aynı test ortamında birlikte değerlendirildiği durumda, hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

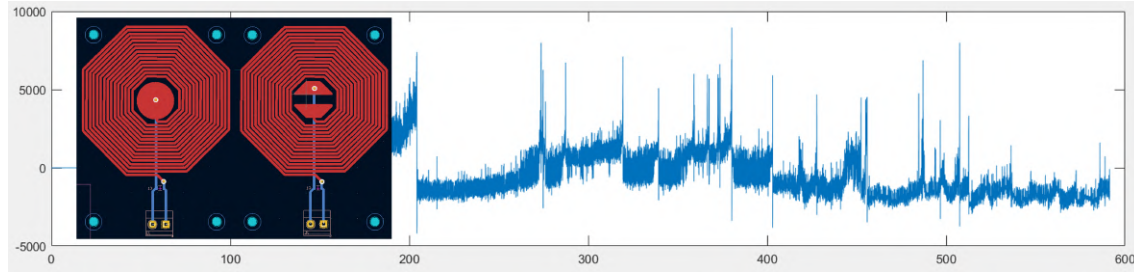


**Şekil 4.19.** İç içe seri bobin ile yapılan testte, hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği

iyileştirerek  $Q$  faktörünü yükseltmede yararlı olduğunu göstermektedir.



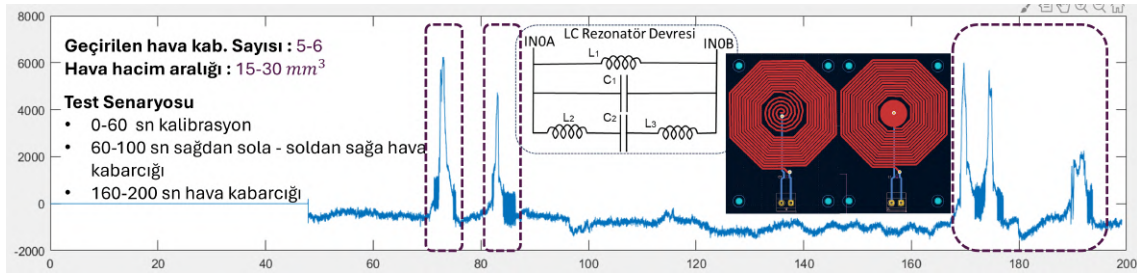
**Şekil 4.20.** İç içe seri bobin ile yapılan testte, hava kabarcığı geçişi sırasında elde edilen sinyal grafiği



**Şekil 4.21.** Dairesel merkezli bobin ile parçalı elektrot yapılı bobinin aynı test ortamında birlikte kullanılmasıyla elde edilen sinyal grafiği

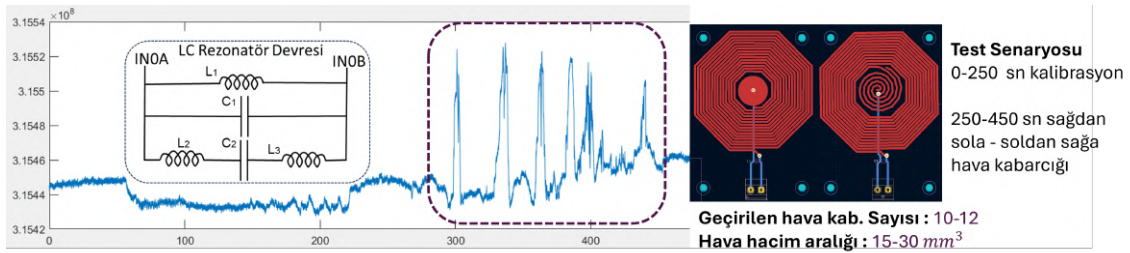
Şekil 4.21, dairesel merkezli bobin ile parçalı elektrot yapılı bobinin karşılıklı seri bağlanarak CH0 kanalında test edildiği deneyin sonuçlarını göstermektedir. Yaklaşık 10–40 mm<sup>3</sup> hacminde hava kabarcıkları hat üzerinden geçirilmiş ve bu geçişler sırasında sinyalde belirgin tepe değerleri oluşmuştur. Ancak ölçüm sırasında gözlenen yüksek gürültü seviyesi, tepe noktalarının yorumu ile algılama doğruluğunu olumsuz etkilemiş ve genel performansı sınırlamıştır.

Şekil 4.22’de, dairesel merkezli bobin ile sarmal merkezli bobinin karşılıklı seri



**Şekil 4.22.** Dairesel merkezli bobin ile sarmal merkezli bobinin aynı test ortamında birlikte kullanılmasıyla elde edilen sinyal grafiği

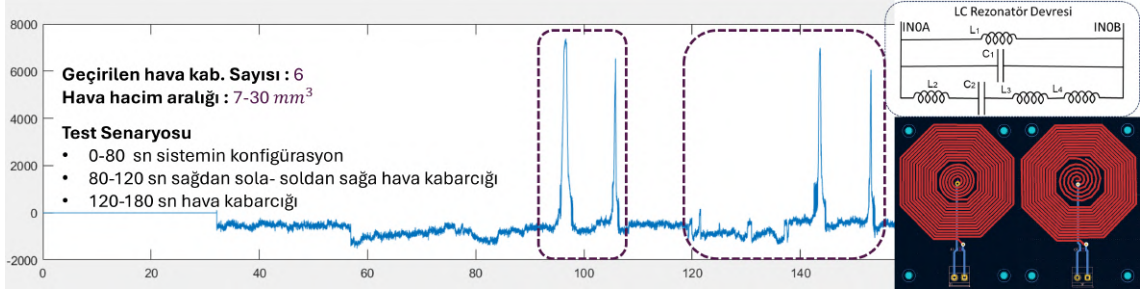
bağlanarak CH0 kanalında test edildiği deneyin sonuçlarını göstermektedir. Yaklaşık  $15-30 \text{ mm}^3$  hacminde hava kabarcıkları hat üzerinden geçirilmiş ve bu geçişler sırasında belirgin tepe değerleri oluşmuştur. Ancak ölçüm sırasında gözlenen yüksek gürültü seviyesi, algılama doğruluğunu olumsuz etkilemiş ve performansı azaltmıştır.



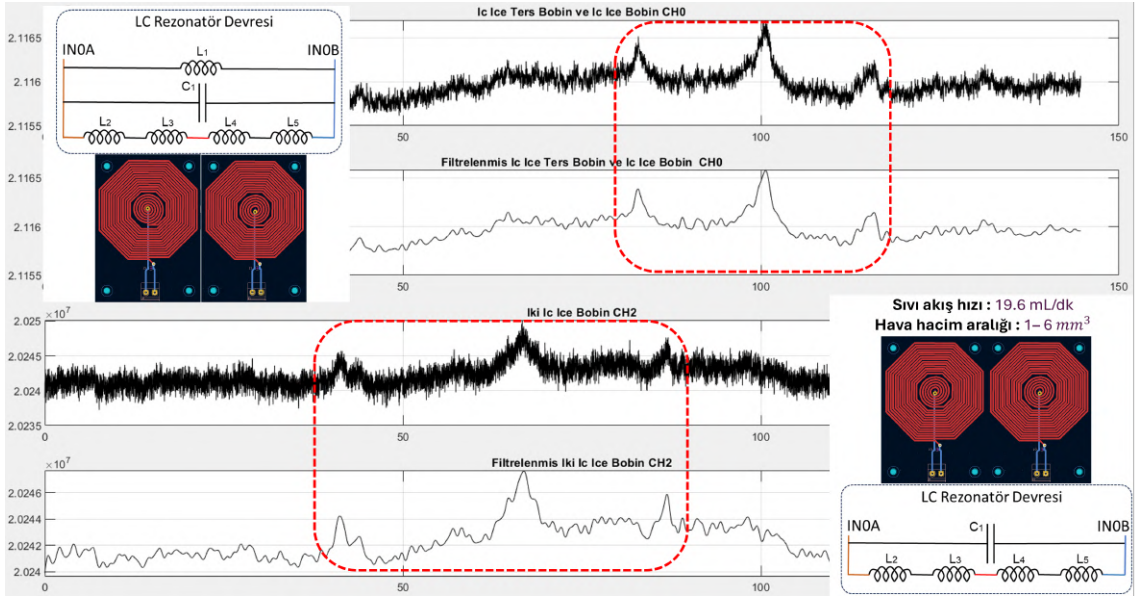
**Şekil 4.23.** Dairesel merkezli bobin ile sarmal merkezli bobinin aynı test ortamında birlikte değerlendirilmesi sonucu elde edilen sinyal grafiği

Şekil 4.23, dairesel merkezli bobin ile sarmal merkezli bobinin seri olarak CH0 kanalına bağlandığı düzenekte elde edilen ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Deneyde, hat üzerinden yaklaşık  $15-30 \text{ mm}^3$  hacminde hava kabarcıkları geçirilmiş; geçiş sırasında bazı kabarcıklar daha küçük parçalara ayrılmıştır. Analizler, özellikle  $10 \text{ mm}^3$ 'ün altındaki kabarcıklar için sinyal genliğinin gürültü seviyesine yaklaştığını ve algılamanın belirginliğinin azaldığını ortaya koymuştur.

Şekil 4.24'de, iç içe seri bobin ile sarmal merkezli bobinin seri bağlanarak CH0 kanalında test edilmesiyle elde edilen ölçüm verileri sunulmuştur. Deney sırasında akış hattından  $7-30 \text{ mm}^3$  hacminde hava kabarcıkları geçirilmiş; bu geçişlerde bazı kabarcıklar daha küçük parçalara bölünmüştür. Yapılan analizde, özellikle  $10 \text{ mm}^3$ 'ün altındaki kabarcıklarda sinyal genliğinin gürültü seviyesine yaklaştığı tespit edilmiştir.

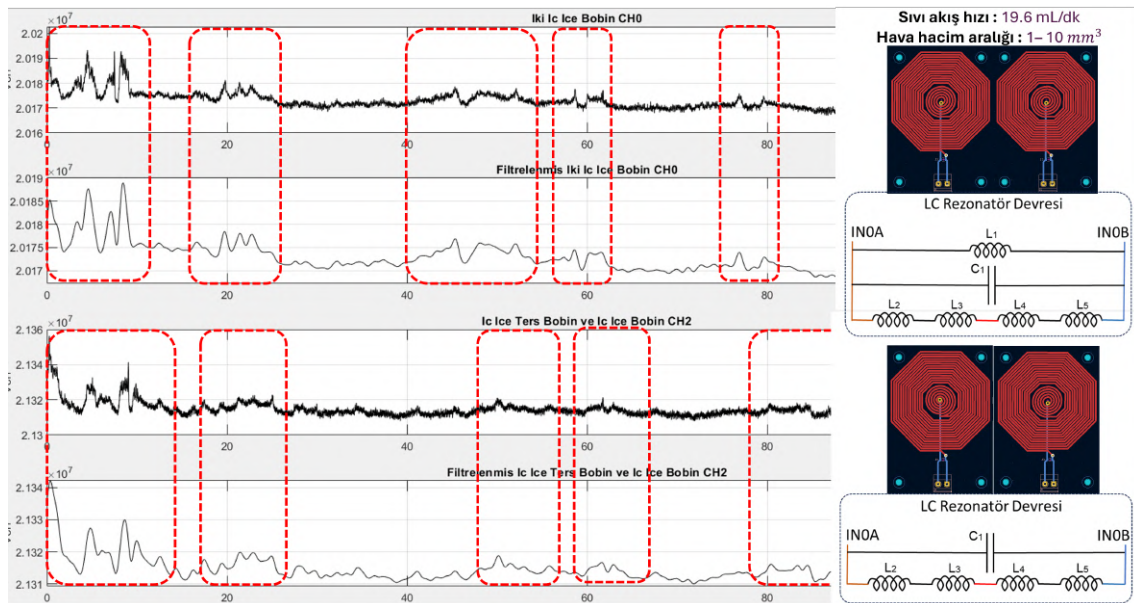


**Şekil 4.24.** İç içe seri bobin ile sarmal bobinin aynı test ortamında birlikte değerlendirilmesi sonucu elde edilen sinyal grafiği



**Şekil 4.25.** Ters yönlü iç içe bobin ve iç içe bobinin seri bağlanarak CH0'a bağlanması aynı şekilde iki adet iç içe seri bobinin birbirine seri olarak bağlanarak CH2'ye bağlanması sonucu elde edilen test sonucu

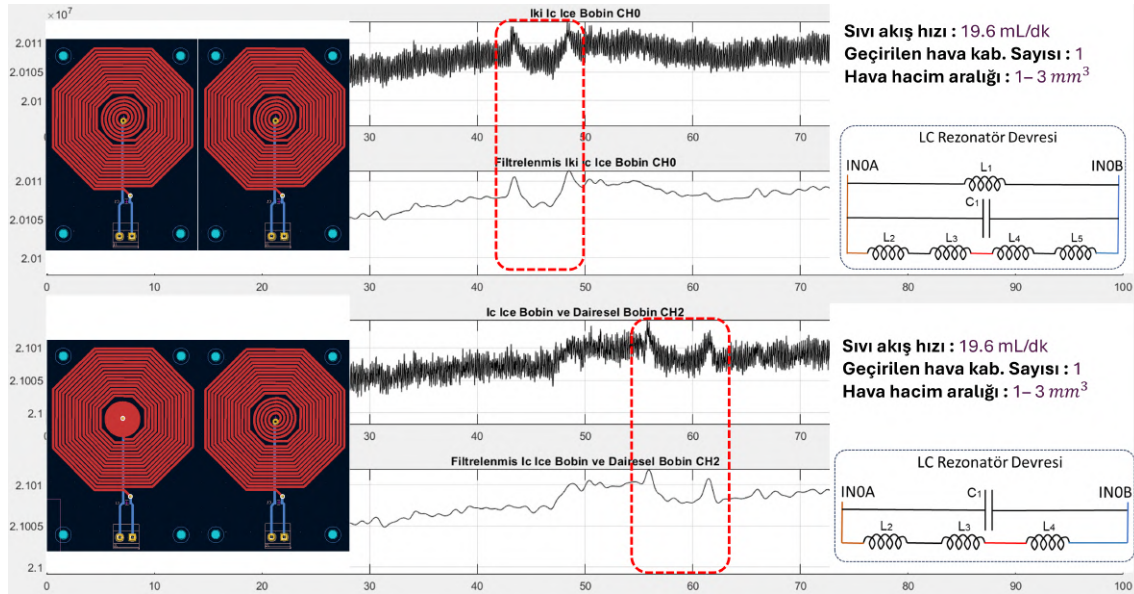
Şekil 4.25 incelendiğinde, iki iç içe bobinden oluşan CH2 konfigürasyonunun hem indüktans ( $L$ ) hem de kalite faktörü ( $Q$ ) bakımından CH0'daki “ters yönlü + iç içe seri” serisine göre üstün bir performans sergilediği görülmektedir. LCR metre ölçümleri, CH2'de indüktansın 31–32  $\mu\text{H}$  değerine ve  $Q$  faktörünün 100 kHz'de 8–9 aralığına yükseldiğini göstermiştir; CH0'da indüktans 28.33  $\mu\text{H}$ 'de,  $Q$  ise 7–8 aralığındadır. Ayrıca CH2 hattındaki tünel etkisi iki benzer bobin arasında simetrik bir manyetik alan süperpozisyonu oluşturduğundan, hava kabarcığı geçişlerinde frekans kayması daha büyük genlikli ve tekrarlanabilir ölçülmüştür. Gürültü düzeyi CH2'de biraz yüksek görünse de sinyal-gürültü oranı, özellikle 1–6  $\text{mm}^3$  hacmindeki üç kabarcığın tümünde yerdeğiştirmeyi ayırt etmeye yeterli seviyededir.



**Şekil 4.26.** Ters yönlü iç içe bobin ile iki adet iç içe bobinin aynı test ortamında birlikte kullanılmasıyla elde edilen sinyal grafiği (ikinci test)

Şekil 4.26, önceki Şekil 4.25'den farklı olarak CH0 ve CH2 bağlantılarının yer değiştirilmiş hâlini göstermektedir: bu kez iki iç içe bobin seri olarak CH0'a, ters yönlü iç içe + iç içe bobin kombinasyonu ise CH2'ye bağlanmıştır. Aynı akış koşullarında kaydedilen veriler, CH0 kanalında genlik farkının belirgin biçimde arttığını ve hava kabarcığına ait karakteristik desenlerin daha net görüldüğünü ortaya koymuştur. Böylece, sabit bir ek L elemanının (sabit bobin) CH0 devresinde bulunmasının hem  $Q$  faktörünü yükselttiği hem de gürültüyü azalttığı doğrulanmıştır. Bu konfigürasyon

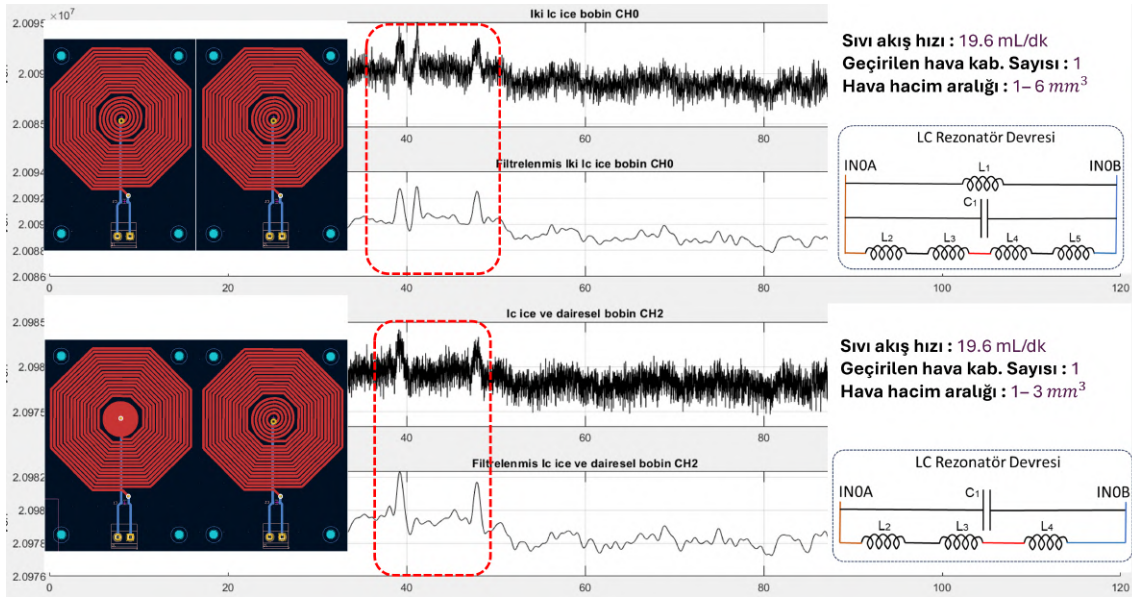
değişikliği, fazladan bobin eklemenin algılama hassasiyetini artırdığı ve deneysel tasarımı desteklediğini göstermektedir.



**Şekil 4.27.** Dairesel merkezli bobin ile iç içe bobin kombinasyonu ve iki iç içe bobinin seri olarak bağlanması sonucunda elde edilen sinyal grafiği

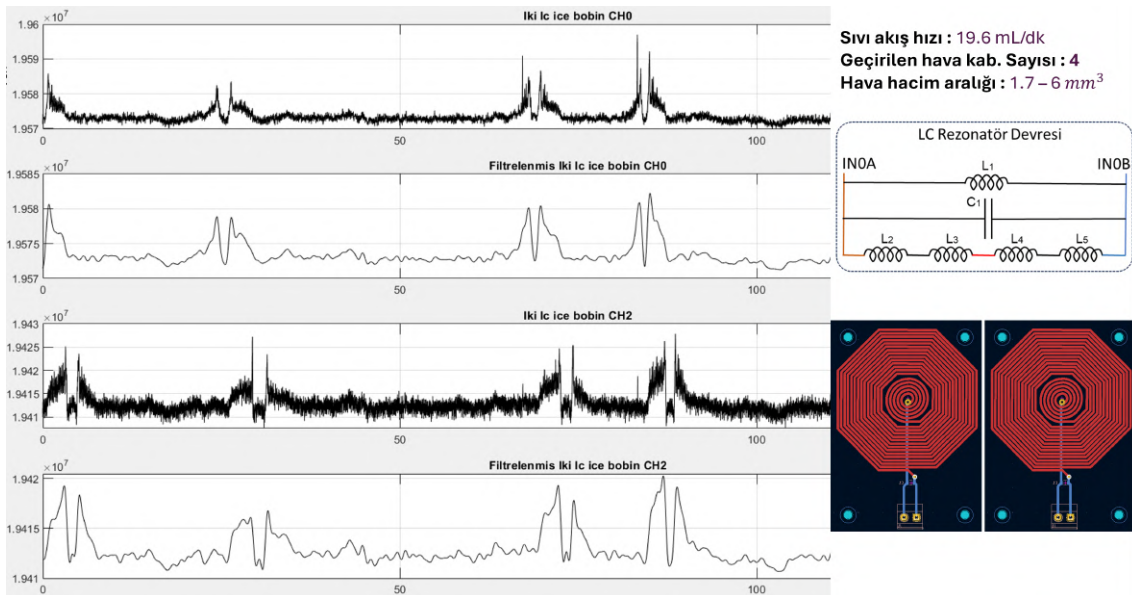
Şekil 4.27’de, CH2 kanalına bağlanan dairese merkezli bobin ile iç içe bobin kombinasyonu, CH0 kanalına bağlanan iki iç içe seri bobin yapısının aynı test ortamında değerlendirilmesi sonucu elde edilen sinyal grafiği yer almaktadır. Deney sırasında sıvı akış hızı 19,6 mL/dk olarak sabitlenmiş ve sistemden 1–3 mm<sup>3</sup> hacminde hava kabarcıkları geçirilmiştir. Her iki yapı da kabarcık tespiti açısından başarılı sonuç göstermiştir. Ancak sinyal genlikleri ve kararlılık dikkate alındığında, iç içe seri bobin kullanılan CH0 kanalında daha güçlü ve net tepkiler elde edilmiştir. Dairesel merkezli ile iç içe seri yapı ise daha yaygın ama biraz daha düşük genlikli yanıt üretmiştir.

Şekil 4.28’de, CH2 kanalına bağlanan dairese merkezli bobin ile iç içe bobin kombinasyonu, CH0 kanalına bağlanan iki iç içe seri bobin yapısının aynı test ortamında değerlendirilmesi sonucu elde edilen sinyal grafiği yer almaktadır. Deney sırasında sıvı akış hızı 19,6 mL/dk olarak sabitlenmiş ve sistemden 1–3 mm<sup>3</sup> hacminde hava kabarcıkları geçirilmiştir. Her iki yapı da kabarcık tespiti açısından başarılı sonuç göstermiştir. Ancak sinyal genlikleri ve kararlılık dikkate alındığında, iç içe seri bobin kullanılan CH0 kanalında daha güçlü ve net tepkiler elde edilmiştir. Yapılan



**Şekil 4.28.** Dairesel merkezli bobin ile iç içe bobin kombinasyonu ve iki iç içe bobinin seri olarak bağlanması sonucunda elde edilen sinyal grafiği (ikinci test)

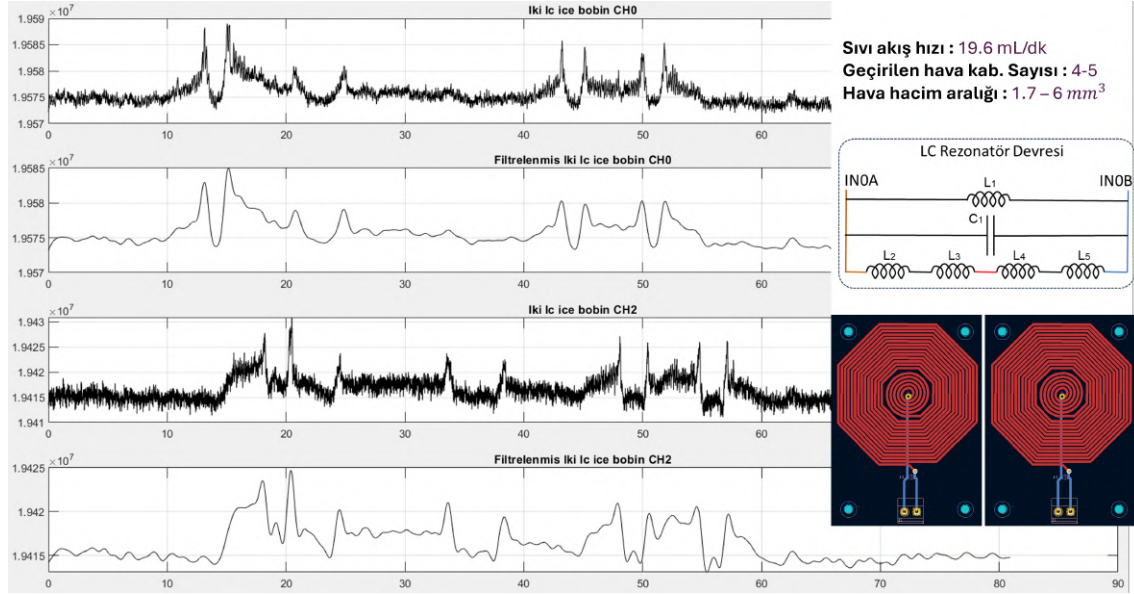
karşılaştırmalı testler, en yüksek algılama hassasiyeti ve en kararlı sinyali iç içe seri bobin tasarımının sağladığını göstermiştir. Bu nedenle tez kapsamında nihai sensör konfigürasyonu olarak iki iç içe seri bobinin tünel etkisinden yararlanan bağlantısı seçilmiştir; tüm tespit algoritmaları bu tasarıma göre uyarlanmıştır.



**Şekil 4.29.** İki iç içe seri yapıları bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-1

Şekil 4.29'de iki iç içe seri bobin, CH0 ve CH2 kanallarına simetrik olarak yerleştirilmiş ve akış hızı 19,6 mL/dk olarak sabit tutulmuştur. Sisteme 1-6 mm<sup>3</sup>

hacminde dört hava kabarcığı verilmiş, ham ve filtrelenmiş sinyaller incelendiğinde her iki kanalda da kabarcık geçişleri belirgin tepe–taban farklarıyla yakalanmıştır. Özellikle CH0 hattında taban gürültüsünün düşük kalması küçük hacimli kabarcıkların ayırt edilmesini kolaylaştırmıştır. Bu sonuç, bobinlerin tünel etkisi sayesinde artan  $L$  ve  $Q$  değerlerinin (yaklaşık  $28 \mu\text{H}$ ,  $Q \approx 7$  ve  $31 \mu\text{H}$ ,  $Q \approx 8$ ) algılama hassasiyetine doğrudan katkı sağladığını göstermektedir.

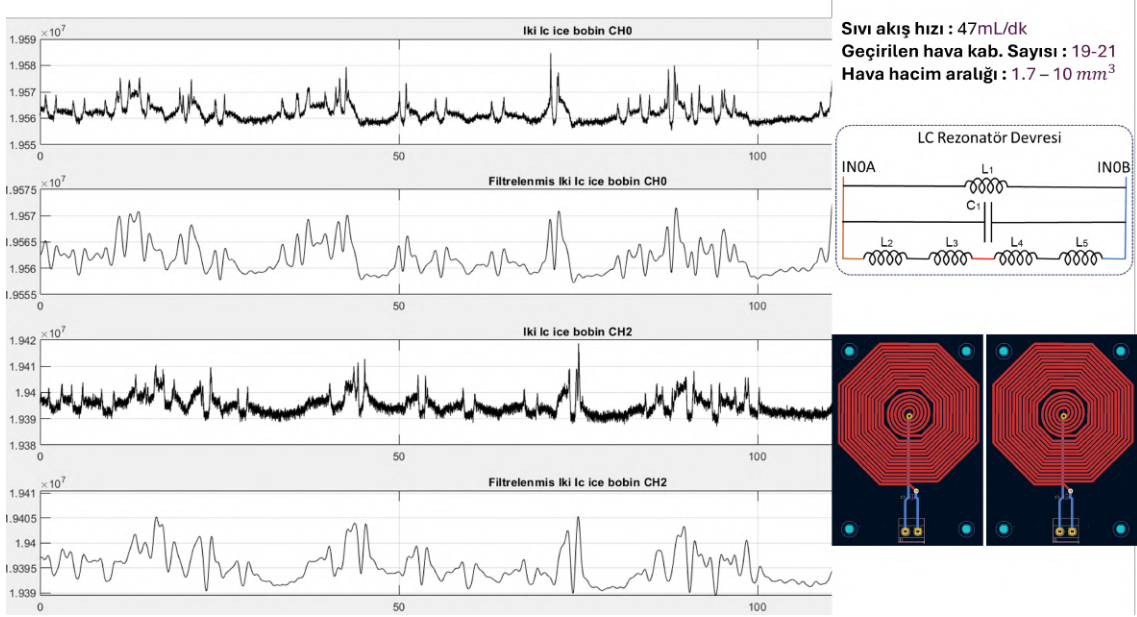


Şekil 4.30. İki iç içe seri yapıları bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-2

Şekil 4.30’de, yine 19,6 mL/dk debide ve 1,7–6 mm<sup>3</sup> aralığında kabarcıklar gerçekleştirilmiş ve ilk deneyde gözlemlenen eğilimlerin tekrarlanabildiğini doğrulamıştır. CH0 kanalındaki düşük gürültü tabanı korunmuş; kabarcık tepkileri keskin, birbirine benzer genliklerde elde edilmiştir.

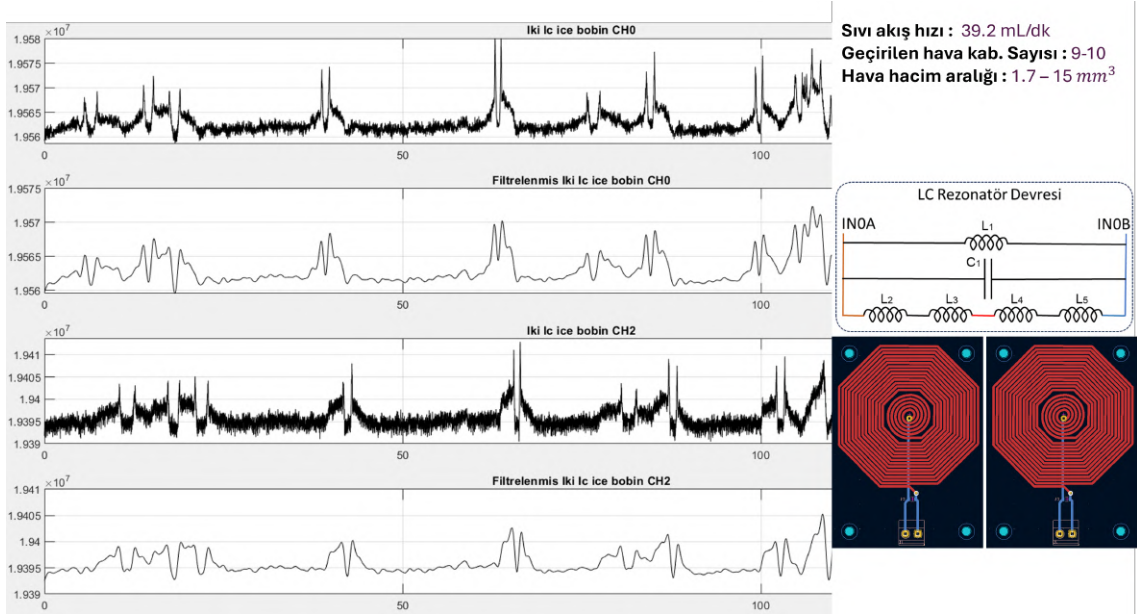
Şekil 4.31’de debi 47 mL/dk seviyesine çıkarılmış ve sisteme 1,7–10 mm<sup>3</sup> hacminde 19–21 kabarcık enjekte edilmiştir. Artan akış hızına karşın tasarım, CH0 ve CH2 hatlarında kabarcıkları net biçimde algılamayı sürdürmüştür. Yüksek debi nedeniyle taban gürültüsünde kısmi artış olsa da CH0 hattı yine daha temiz bir spektrum sunmuş; küçük kabarcıkların frekans kaymaları filtrelenmiştir. Böylece iki iç içe seri bobin konfigürasyonunun, hem düşük hem de yüksek debi koşullarında kararlı ve hassas ölçüm yapabildiği doğrulanmıştır.

Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’deki grafiklerden anlaşıldığı üzere küçük



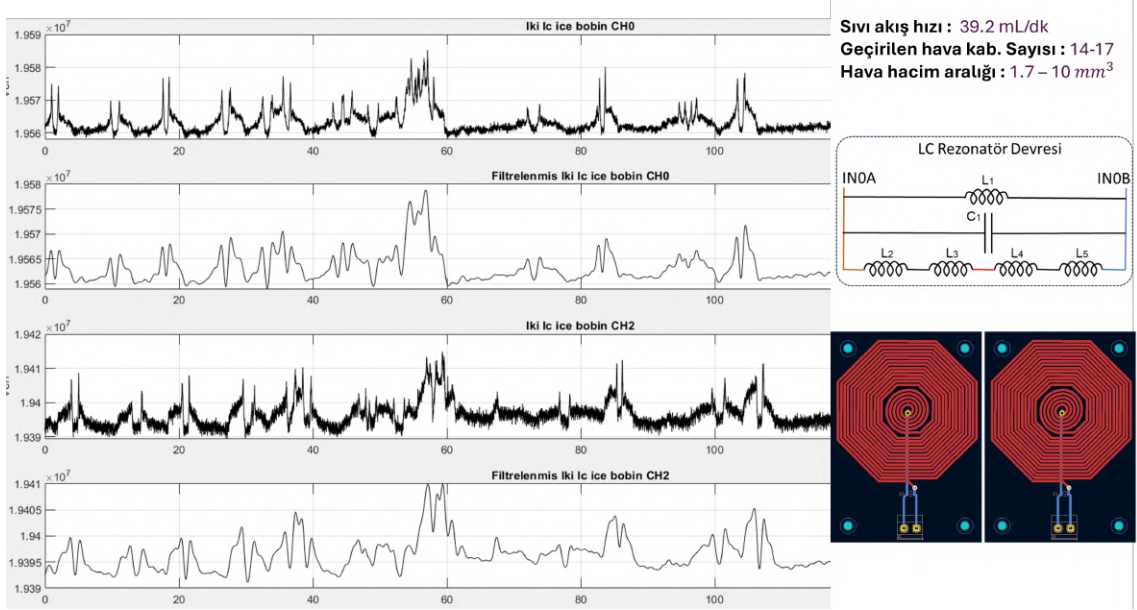
Şekil 4.31. İki iç içe seri yapıları bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-3

hacimli kabarcıkları sistemimizin algılayabildiği görülmektedir. Buda tasarlanan sistemin klinik ve endüstriyel uygulamalarda güvenilir biçimde kullanılabilmesine işaret etmektedir.

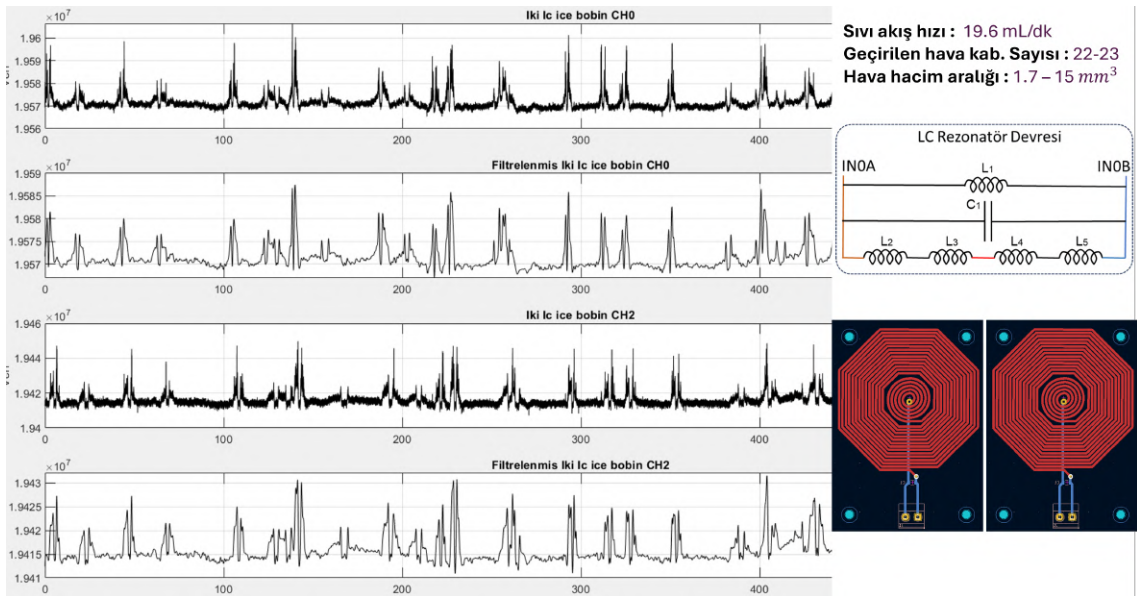


Şekil 4.32. İki iç içe seri yapıları bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-4

Şekil 4.34'de 19,6 mL/dk sıvı akış hızında test gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.32 ve

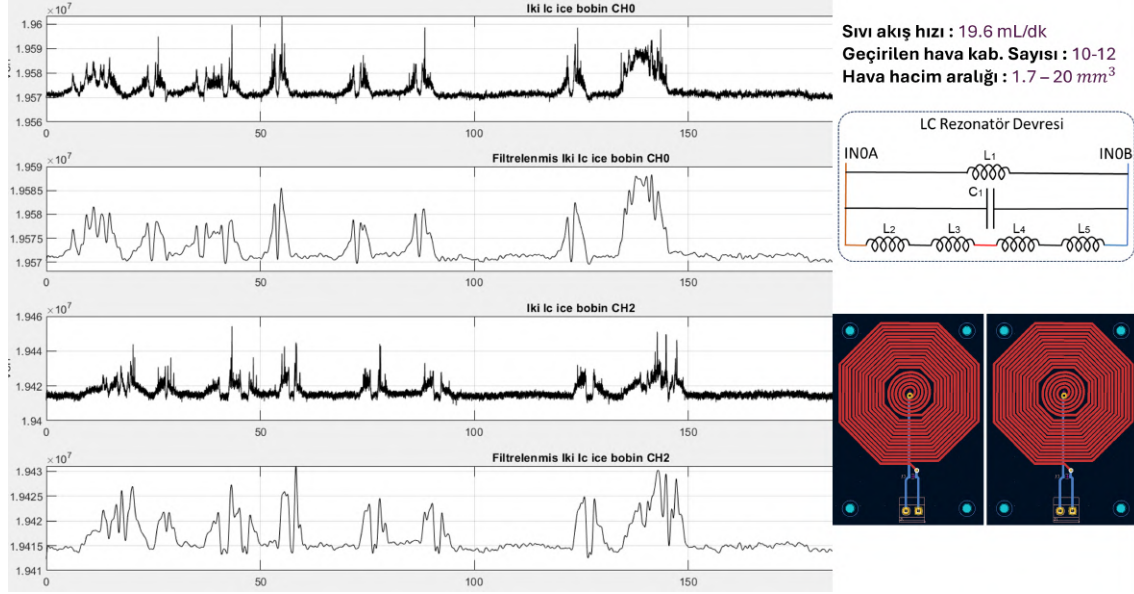


Şekil 4.33. İki iç içe seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-5

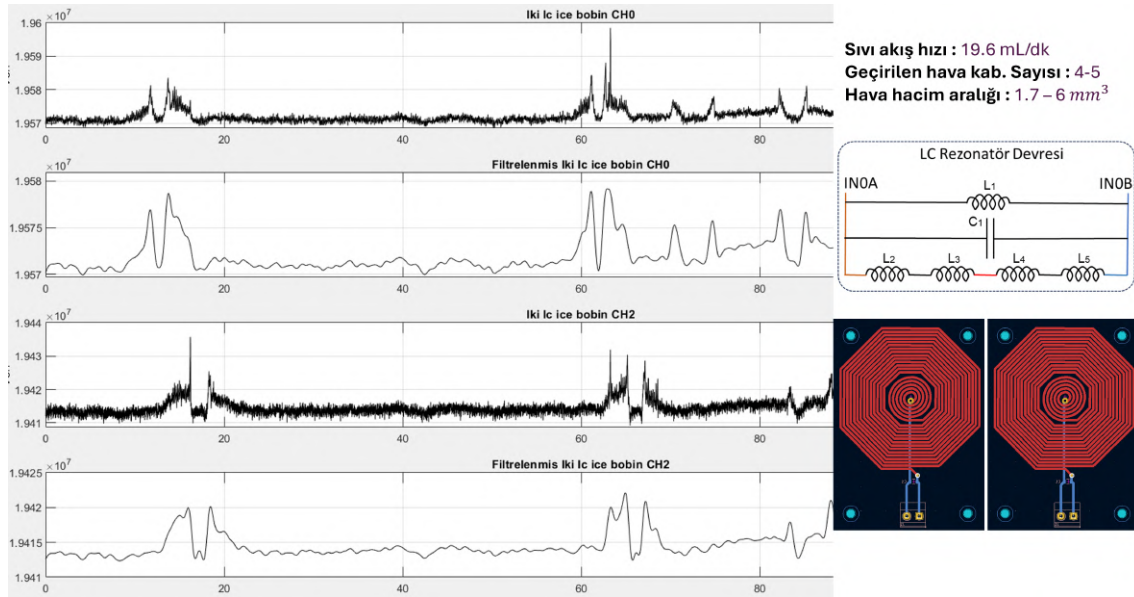


Şekil 4.34. İki iç içe seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-6

Şekil 4.33'de 39,2 mL/dk sıvı akış hızında test gerçekleştirilmiştir. İki iç içe seri bobin tasarımının farklı kabarcık senaryolarında tutarlı bir algılama sergilediği görülmektedir.



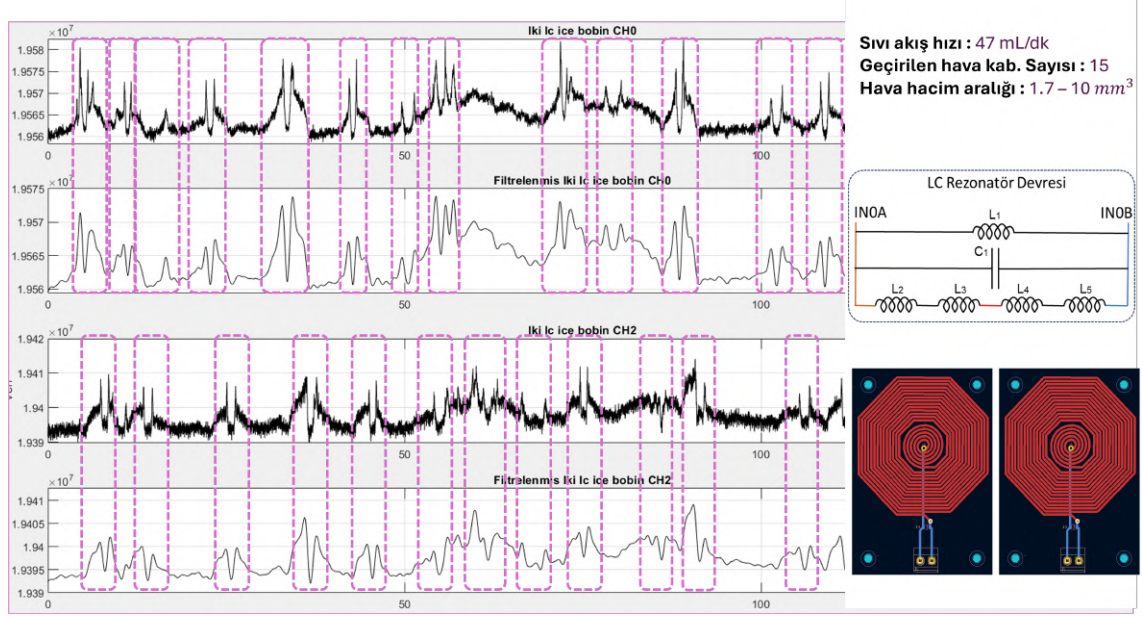
Şekil 4.35. İki iç içe seri yapılu bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-7



Şekil 4.36. İki iç içe seri yapılu bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-8

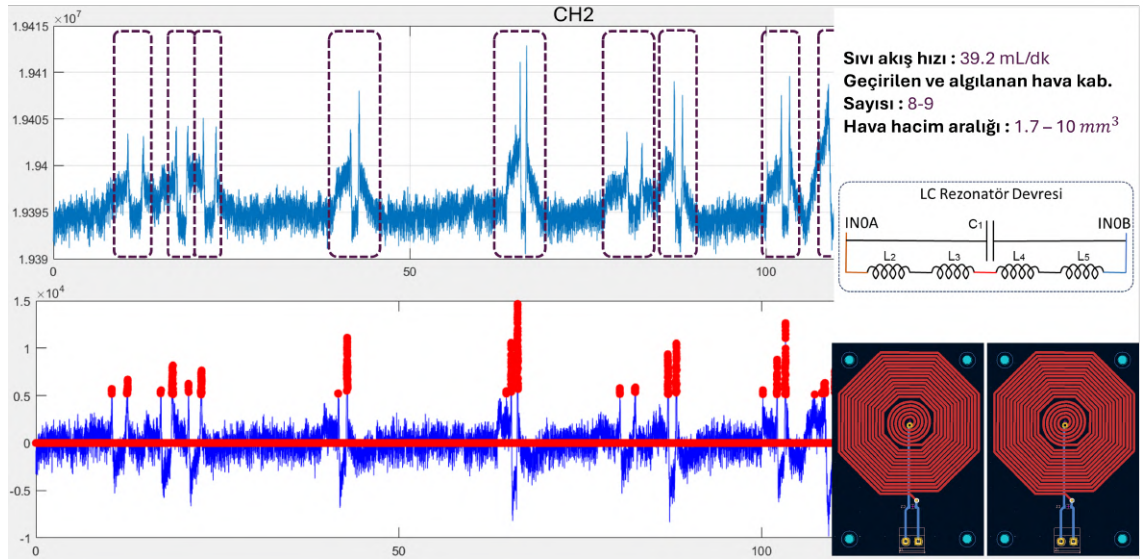
Şekil 4.35 ve Şekil 4.36, iki iç içe seri bobin konfigürasyonunun 19,6 mL/dk sabit akış koşulunda gerçekleştirilmiş iki farklı denemesini karşılaştırmaktadır. İki iç içe seri bobin tasarımının kabarcık sayısı ve hacmi değişse dahi tutarlı tepki verdiğini, ayrıca CH0 konfigürasyonunun gürültü bastırma açısından bir nebze avantaj sunduğunu

göstermektedir.



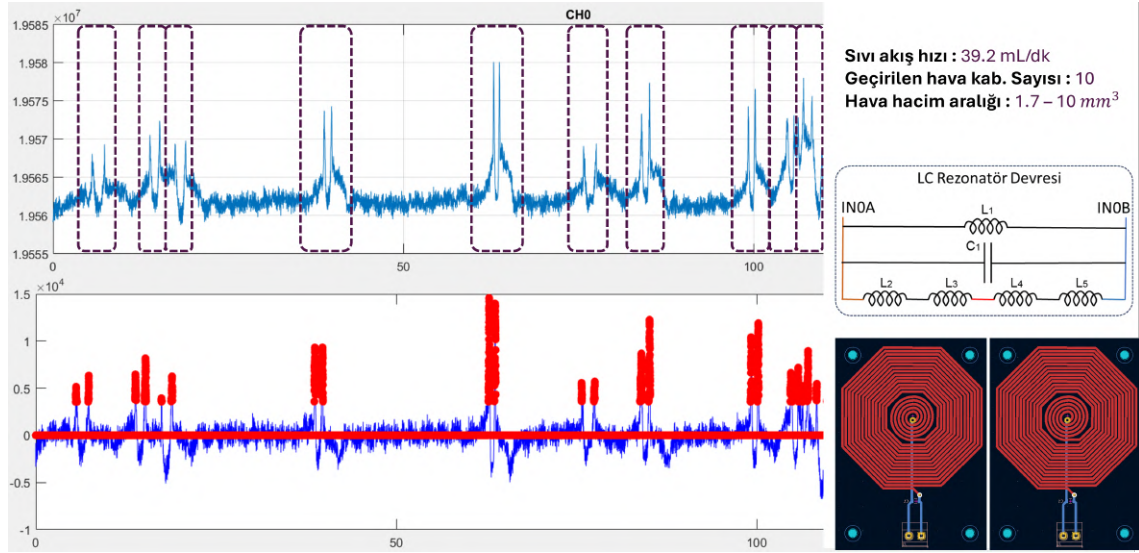
**Şekil 4.37.** İki iç içe seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-9

Şekil 4.37, iki iç içe seri bobin hem CH0 hem de CH2 hatlarına yerleştirilmiş ve akış hızı 47 mL/dk olarak ayarlanmıştır. Toplam 15 hava kabarcığı uzunlamasına hat boyunca ilerletilmiştir. Mor dikdörtgenlerle işaretlenen bölgeler, hava kabarcığının geçişini ifade etmektedir. Çeşitli hacimlerdeki kabarcıklar grafikte net biçimde seçilebilir durumdadır; iki ardışık tepe arasında kalan kısım tek bir kabarcığı temsil etmektedir.



**Şekil 4.38.** İki iç içe seri yapılı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-10

Şekil 4.38’de CH2 için ölçülen hava kabarcığı grafiği yer almaktadır. Oluşturulan hava kabarcığı tespit algoritması ile bulunan hava kabarcıkları kırmızı ile işaretlenmiştir. 9 tane hava kabarcığı geçirilen sistemde hava tespit algoritması test edilmiş ve tüm hava kabarcıklarını algılamayı başarmıştır. Taban gürültü miktarı CH0’a göre biraz daha fazladır.

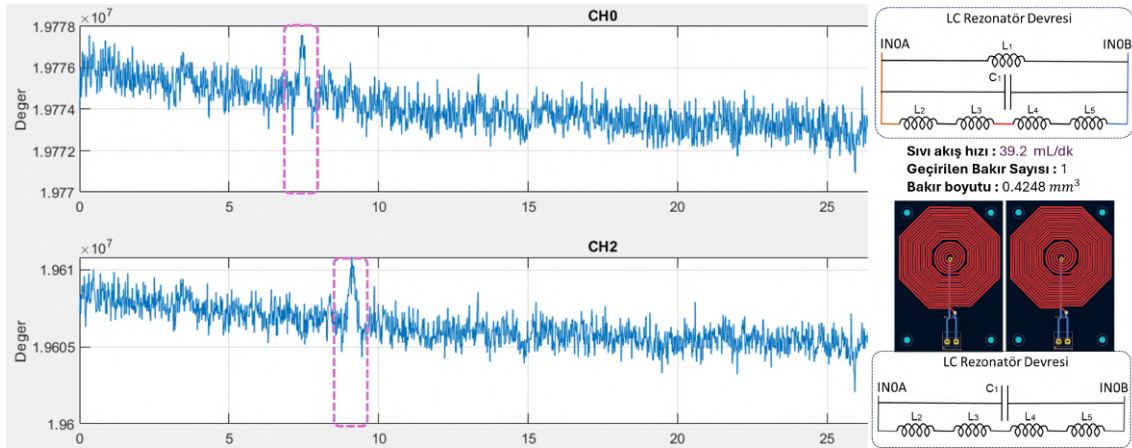


Şekil 4.39. İki iç içe seri yapı bobinin bağlanması sonucu elde edilen sinyal grafiği-11

Şekil 4.39, CH0 için ölçülen hava kabarcığı grafiği yer almaktadır. Oluşturulan hava kabarcığı tespit algoritması ile bulunan hava kabarcıkları kırmızı ile işaretlenmiştir. Yapılan testlerde algoritma tüm hava kabarcıklarını bulmayı başarmıştır.

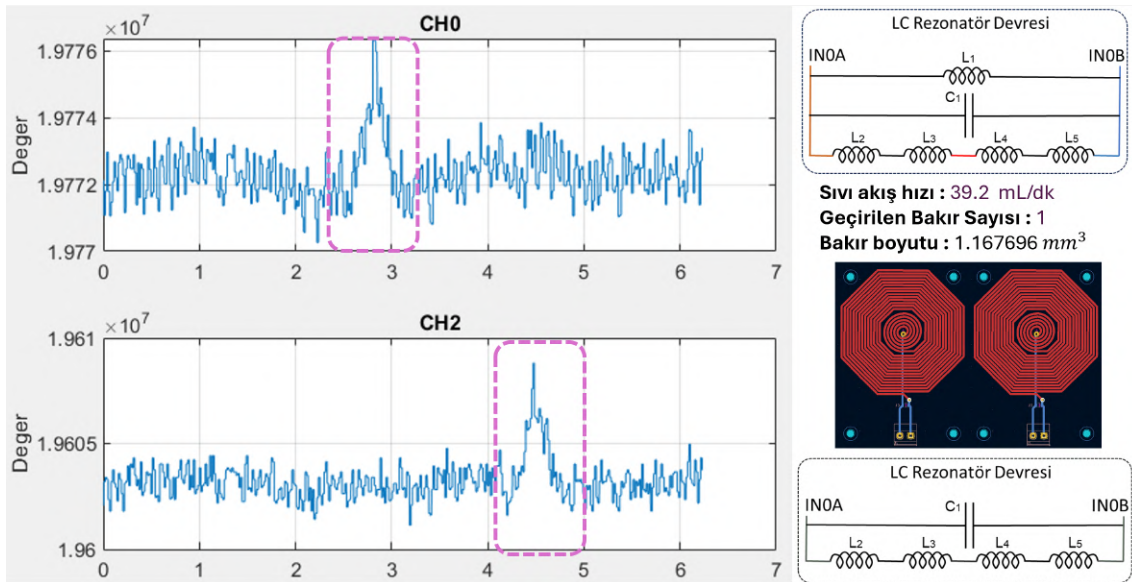
Gerçekleştirilen testler, geliştirilen hava kabarcığı ve metal partikül tespit algoritmasının güvenilir biçimde çalıştığını ortaya koymuştur. Grafiklerde kırmızıyla işaretlenen bölgeler, sensör üzerinden geçen kabarcıkların algılanma anlarını açıkça göstermektedir. Algoritmanın yüksek doğrulukla tespit yapabilmesi, iç içe seri bobin tasarımının manyetik akıyı merkezde yoğunlaştırarak gürültüyü bastırmasıyla mümkün olmuştur. Elde edilen sonuçlar, bu bobin mimarisinin hem medikal IV hatları hem de endüstriyel sıvı transfer sistemleri için sağlam, tekrarlanabilir ve uygulanmaya hazır bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.40’de iki iç içe seri yapı bobin konfigürasyonu kullanılarak elde edilen sinyalin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Grafik, CH0 ve CH2 olmak üzere iki ayrı kanaldan alınan verileri içermektedir. Her iki kanalda da yaklaşık 5-10 saniye aralığında



**Şekil 4.40.** İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-1

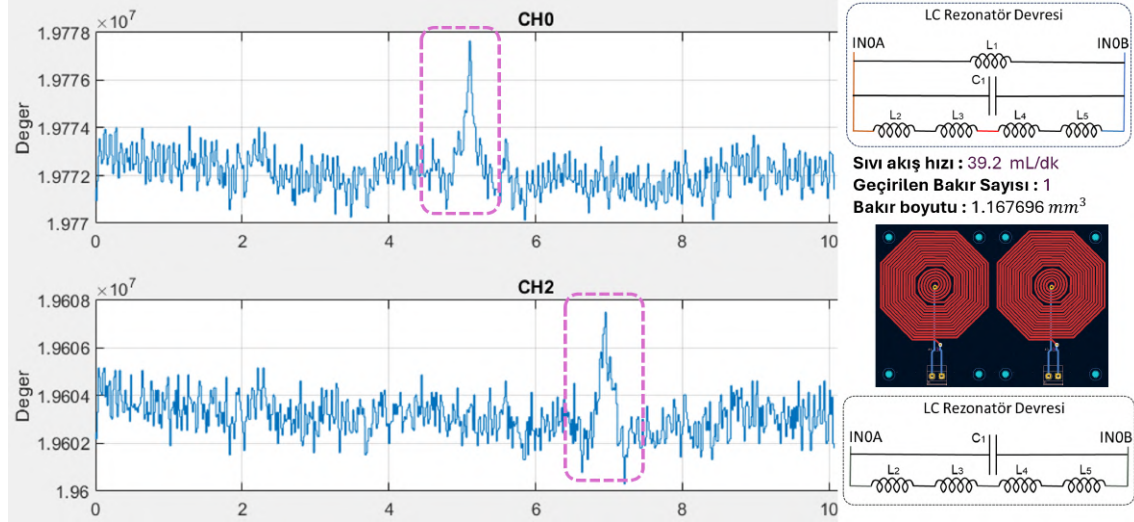
belirgin bir sinyal keskinliği gözlemlenmektedir. Bu ani değişim, bobinler arasından bir adet  $0,4240 \text{ mm}^3$  hacminde bakır partikülün geçişine karşılık gelmektedir. Sinyalin darbe tipi karakteristiği, metal partikülün manyetik alan üzerindeki etkisiyle rezonans frekansının kısa süreli olarak değişime uğradığını göstermektedir. LC devre yapısı ve iç içe geçmiş çok katmanlı bobin tasarımı, algılamanın hassasiyetini artırmaktadır. Sonuç olarak bu grafik, geliştirilen sensör sisteminin küçük hacimli iletken partiküllerin tespitinde yüksek duyarlılıkla çalıştığını kanıtlamaktadır.



**Şekil 4.41.** İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-2

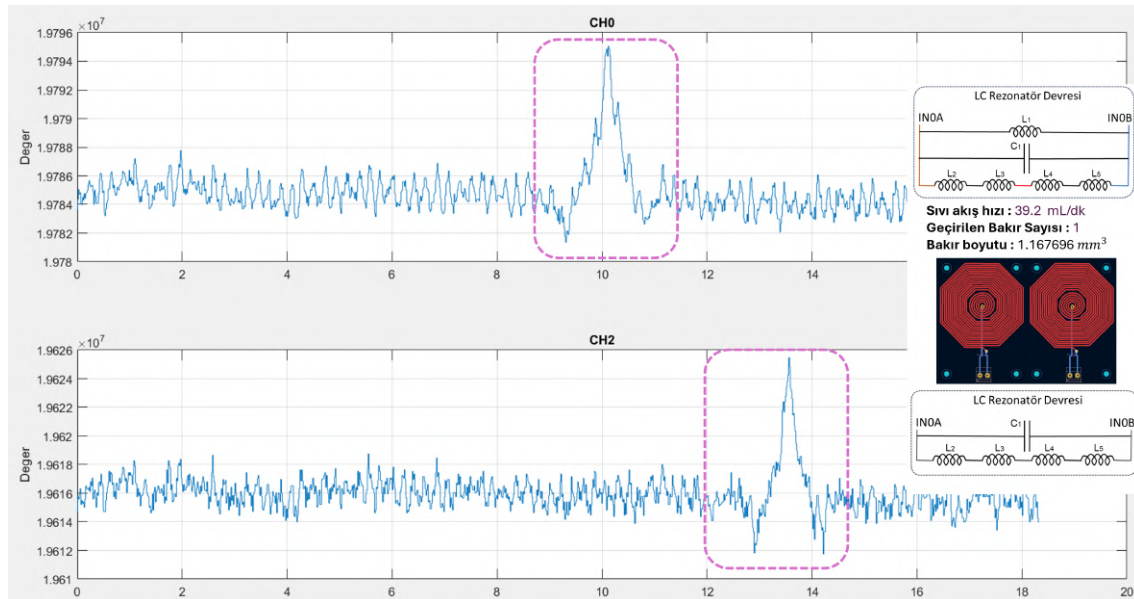
Şekil 4.41’de iki iç içe seri yapılı bobin sisteminden  $1,167696 \text{ mm}^3$  hacmindeki

bir bakır partikülün geçişi sırasında elde edilen sinyaller sunulmuştur. CH0 ve CH2 kanallarındaki ölçümler, partikülün yaklaşık 2 ile 5. saniyeler arasında sensör bölgesinden geçtiğini açıkça göstermektedir.



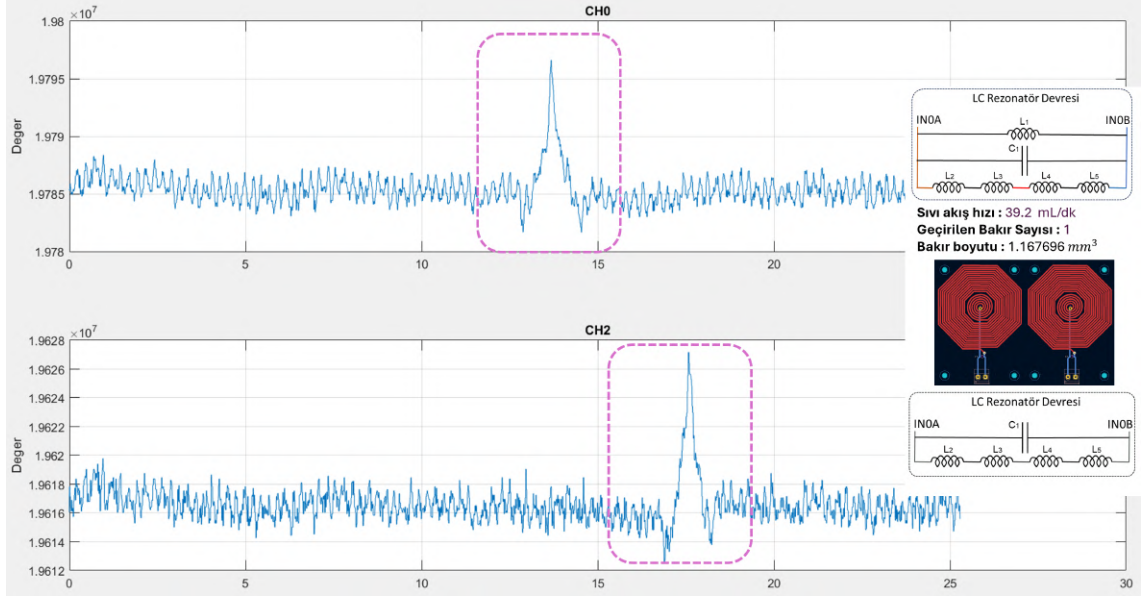
**Şekil 4.42.** İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-3

Şekil 4.42’te iki iç içe seri yapılı bobinden 1,167696 mm<sup>3</sup> hacmindeki bir bakır partikül geçerken elde edilen sinyaller gösterilmiştir. CH0 ve CH2 kanallarında, partikülün yaklaşık 4 ile 8. saniyeler arasında sensör bölgesinden geçtiği net şekilde izlenmektedir.



**Şekil 4.43.** İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-4

Şekil 4.43'te karşılıklı iki bobin arasından  $1,167696 \text{ mm}^3$  hacmindeki bir bakır partikül geçerken oluşan sinyaller gösterilmiştir. CH0 ve CH2 kanallarında, partikülün yaklaşık 8 ile 14. saniyeler arasında sensör bölgesinden geçtiği net şekilde izlenmektedir.



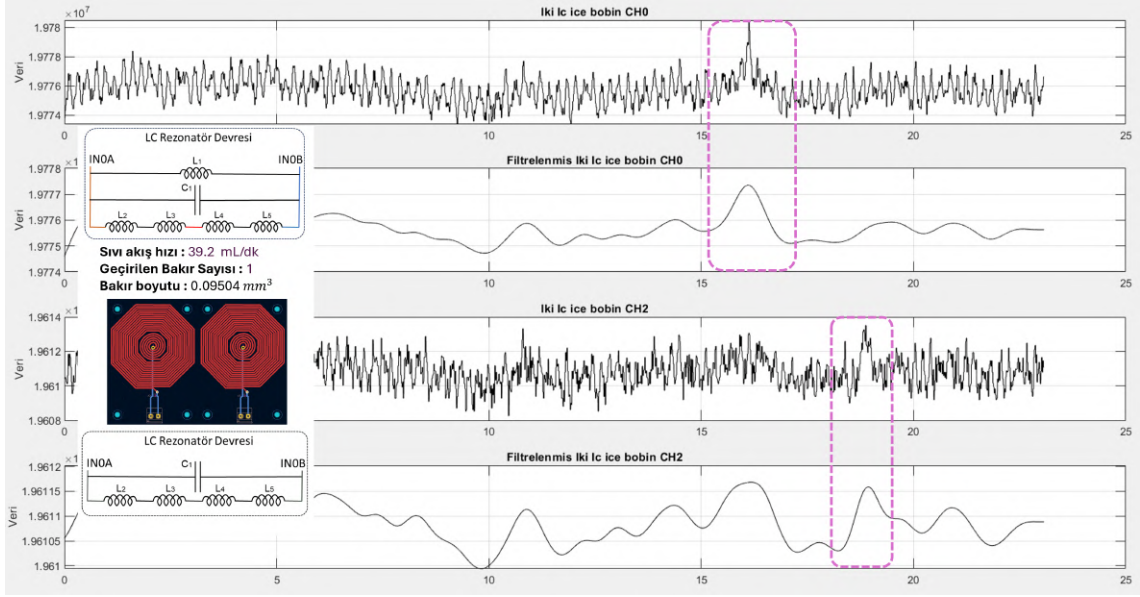
**Şekil 4.44.** İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-5

Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te karşılıklı iki bobin arasından farklı hacimlerdeki bakır partiküllerin geçişi sırasında oluşan sinyaller gösterilmiştir.

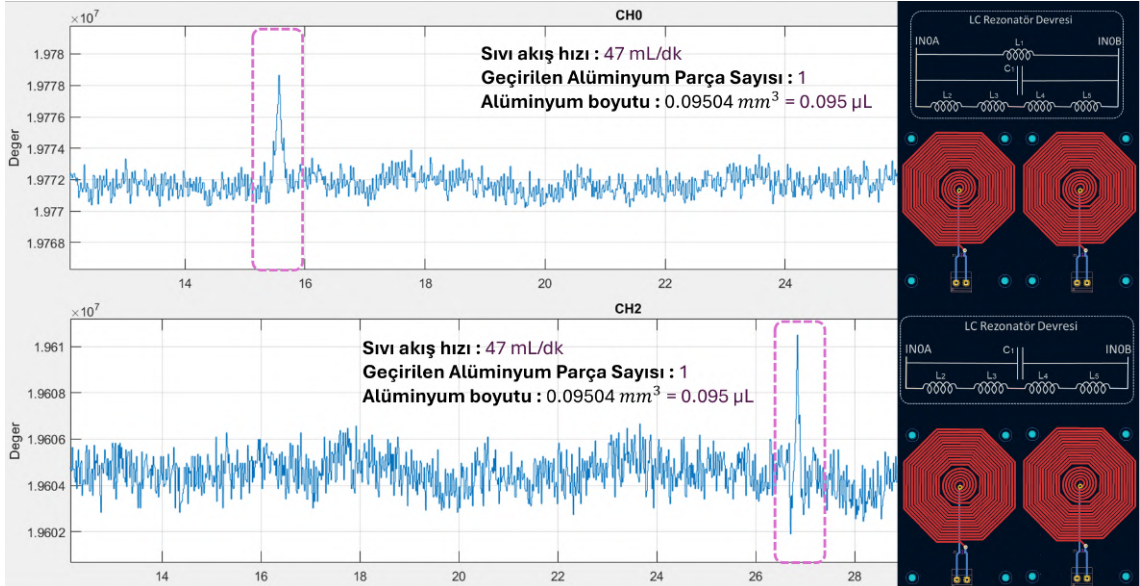
Şekil 4.46'de iki iç içe seri yapılı bobin sistemi ile  $0,09504 \text{ mm}^3$  hacmindeki bir alüminyum partikülün geçişine ait CH0 ve CH2 kanal sinyalleri sunulmuştur.

Şekil 4.46, Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'da, karşılıklı yerleştirilmiş iki iç içe seri yapılı bobin sistemi üzerinden  $0,09504 \text{ mm}^3$  hacmindeki bir alüminyum partikülün geçişine ait farklı zaman aralıklarında kaydedilen sinyal grafiklerine yer verilmiştir. Her üç grafikte de düşük genlikli fakat belirgin sinyal tepkileri gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, geliştirilen sensör yapısının alüminyum gibi düşük manyetik geçirgenliğe sahip metallerin tespitinde dahi yeterli hassasiyeti sağlayabildiğini göstermektedir.

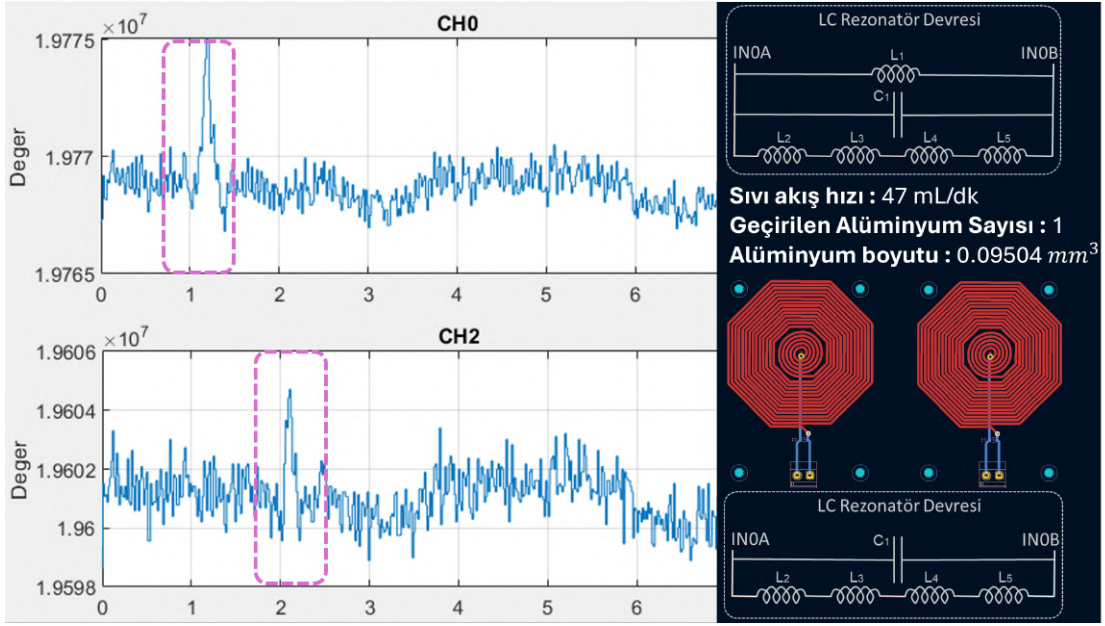
Şekil 4.49'de, karşılıklı yerleştirilmiş iki iç içe seri yapılı bobin sistemi üzerinden  $1,508 \text{ mm}^3$  hacmindeki bir Kalay ve Kurşun alaşımı partikülünün geçişi sırasında elde



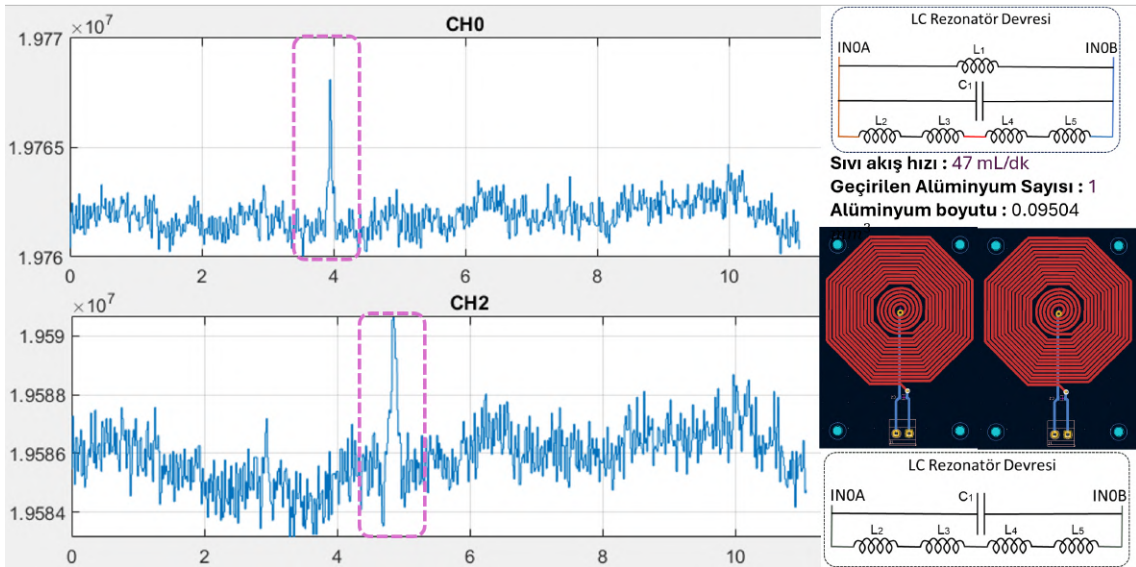
**Şekil 4.45.** İki iç içe seri yapılı bobin ile Bakır partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-6



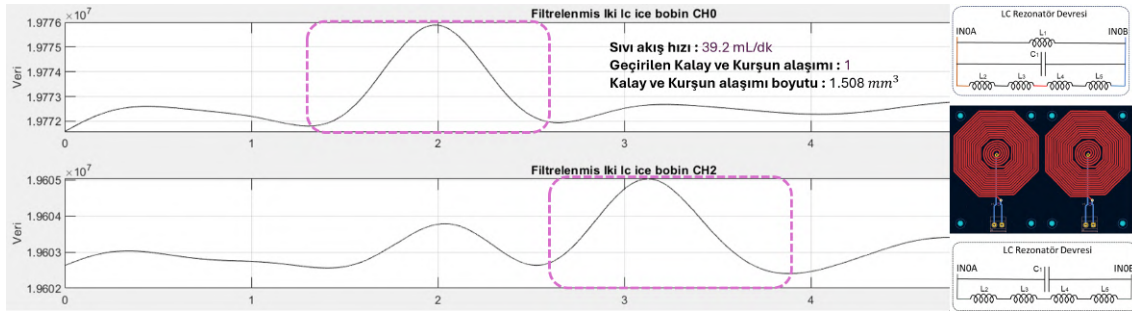
**Şekil 4.46.** İki iç içe seri yapılı bobin ile Alüminyum partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-1



Şekil 4.47. İki iç içe seri yapılı bobin ile Alüminyum partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-2



Şekil 4.48. İki iç içe seri yapılı bobin ile Alüminyum partiküllerin geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği-3



**Şekil 4.49.** İki iç içe seri yapıli bobin ile Kalay ve Kurşun alaşımının geçişi sonucu elde edilen sinyal grafiği

edilen filtrelenmiş CH0 ve CH2 sinyalleri gösterilmiştir. Yaklaşık 1 ile 4 saniyeler arasında her iki kanalda da belirgin ve simetrik bir sinyal tepkisi izlenmektedir. Bu durum, sensörün farklı metal karışımlarına karşı da duyarlı çalıştığını ve sadece saf metaller değil, alaşımların da algılanabilir olduğunu göstermektedir.

## 4.2. Bulgular

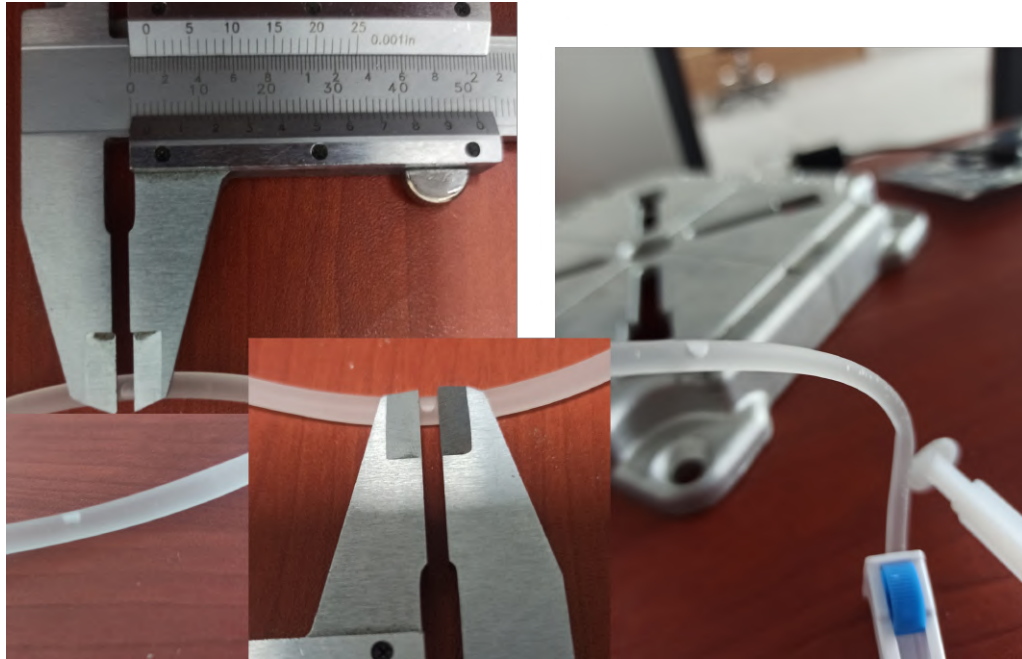
Bu tez çalışmasında geliştirilen manyetik algılama tabanlı sensör sistemi, hem medikal hem de endüstriyel uygulamalar için hassas, güvenilir ve düşük maliyetli bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle intravenöz (IV) sıvılardaki hava kabarcıklarını algılayarak emboli riskini en aza indirmeyi hedeflerken, endüstriyel sıvı hatlarındaki metal partiküllerin tespitini sağlayarak akışkan sistemlerinin verimliliğini artırmaktadır. Yapılan deneyler, geliştirilen sistemin farklı sıvı türleri ve değişen akış hızları karşısında stabil performans sergilediğini doğrulamıştır.

**Çizelge 4.1.** Peristaltik motor ile sıvı akış hattında oluşturulan akış hızı ve bu sıvı içerisinden geçen hava ve metal partiküllerin algılanan minimum hacimleri

Sıvı akış hızı	Algılanabilen minimum hava kabarcığı boyutu, (Önemsiz kabul edilen hacim 50 mm <sup>3</sup> (Wilkins ve Unverdorben, 2012))	Algılanabilen minimum bakır boyutu	Algılanabilen minimum kalay ve kurşun alaşımı boyutu	Algılanabilen minimum alüminyum boyutu
≈ 47 mL/dk	1,762 mm <sup>3</sup>	0,4248 mm <sup>3</sup>	1,508 mm <sup>3</sup>	0,09504 mm <sup>3</sup>
≈ 39,2 mL/dk	1,762 mm <sup>3</sup>	0,4248 mm <sup>3</sup>	1,508 mm <sup>3</sup>	0,09504 mm <sup>3</sup>
≈ 19,6 mL/dk	1,761 mm <sup>3</sup>	0,4248 mm <sup>3</sup>	1,508 mm <sup>3</sup>	0,09504 mm <sup>3</sup>

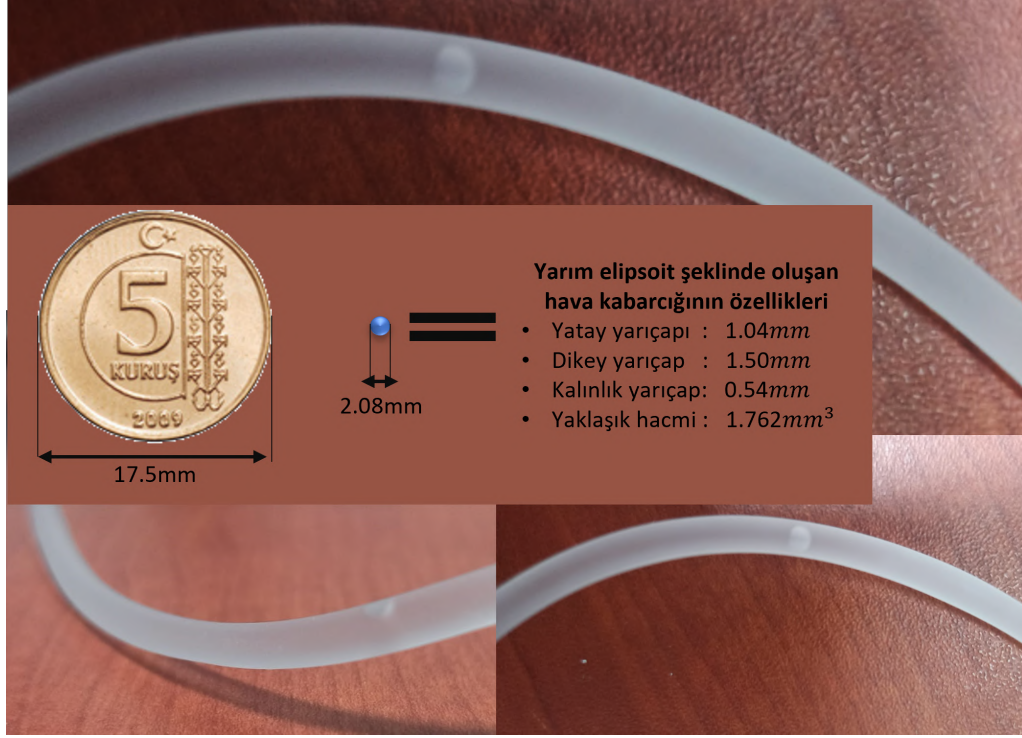
Geliştirilen hava kabarcığı ve metal partikül tespit algoritması, sistem açılışında otomatik kalibrasyon yaparak çevresel değişkenliklere uyum sağlamaktadır. Bu algoritma, hareketli ortalama yöntemiyle referans sinyal seviyesini belirlemekte ve ani

değişimleri ön plana çıkarmak için yüksek geçiren filtreler uygulamaktadır. MATLAB ortamında başarıyla test edildikten sonra mikrodenetleyiciye entegre edilmiş ve gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek doğrulukla çalıştığı kanıtlanmıştır. Algoritma, peristaltik motor ile oluşturulan farklı akış hızlarda (yaklaşık 47 mL/dk, 39,2 mL/dk, 19,6 mL/dk)  $1,761 \text{ mm}^3$  boyutundaki minimum hava kabarcıkları Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'deki görsellerde yer almaktadır.  $2 \text{ mm}^3$  demir,  $2,55 \text{ mm}^3$  bakır ve  $3 \text{ mm}^3$  alüminyum parçacıklarını güvenilir bir şekilde algılayabilmiştir. Bu başarılı tespit, iç içe seri bobin tasarımının manyetik akıyı merkezde yoğunlaştırarak gürültüyü bastırmasıyla mümkün olmuştur. Sistem, bu küçük hacimli kabarcıkları dahi algılayabildiğini grafiklerle göstermiştir. Tablo 4.1'da yer almaktadır. Şekil 4.53'de ise sıvı akış hattı içerisinde geçen yabancı partikül ve hava kabarcıklarının gösterimi ve bu geçiş sırasında oluşan grafik yer almaktadır.



**Şekil 4.50.** Kumpas ile hava hacminin yaklaşık boyutunu tespit etmek

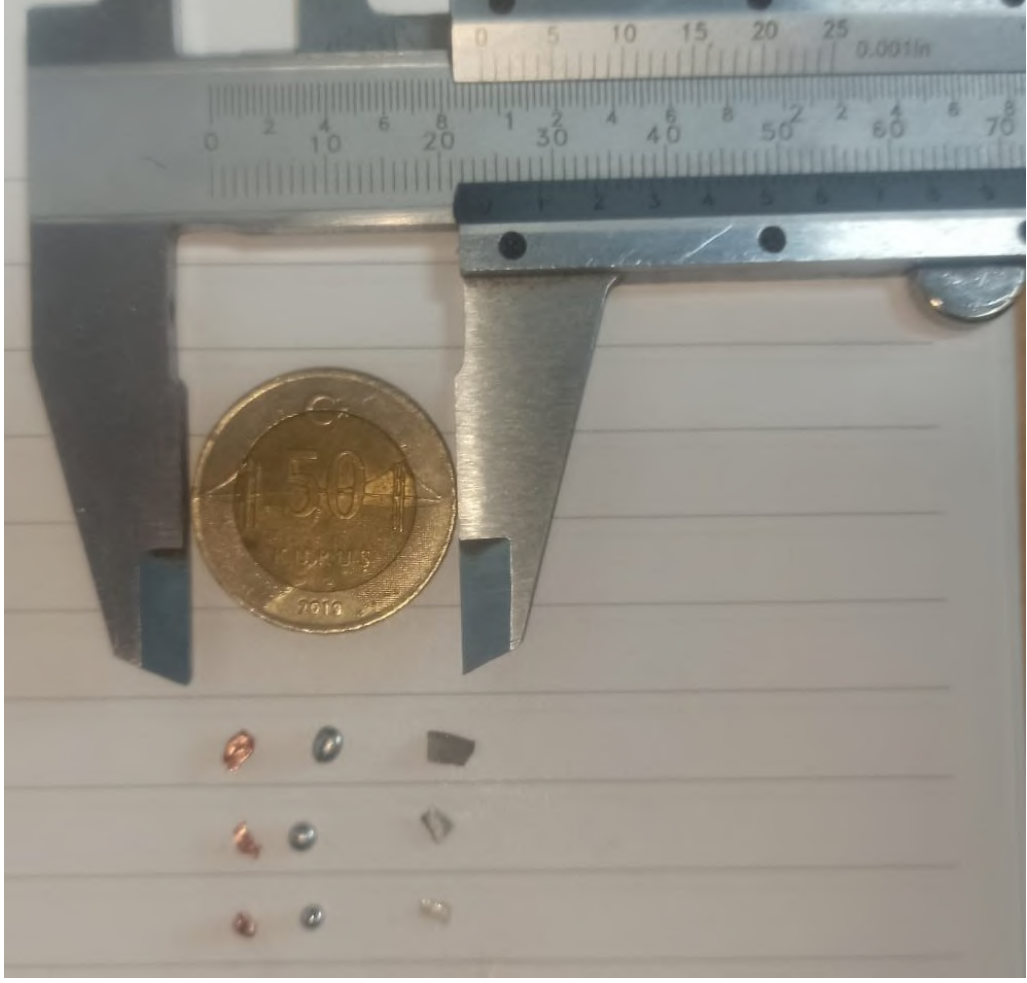
Şekil 4.52'te, geliştirilen algılama sistemiyle tespit edilebilen metal partiküllerin boyutlarını gösteren bir referans görsel sunulmuştur. Görselde farklı boyut ve şekillerde bakır, alüminyum, kurşun ve diğer metal alaşımlarına ait parçalar yer almakta olup, bu parçaların sistem tarafından güvenilir şekilde algılanabilmesi, sensörün hassasiyetini görsel olarak desteklemektedir.



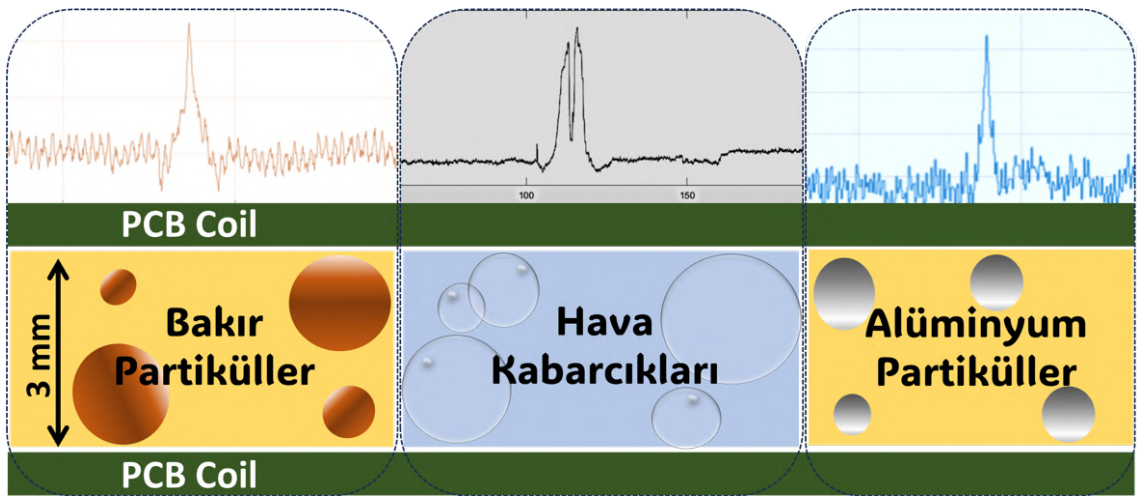
**Şekil 4.51.** Hortum içerisinden geçen hava kabarcığı boyutu

Algılama sisteminin temelini oluşturan düzlemsel PCB bobinleri, sıvı akış hattının alt ve üst kısmına karşılıklı olarak yerleştirilerek "manyetik tünel etkisi" oluşturulmuştur. Bu etki, algılama hacminin ortasında yoğun ve kararlı bir manyetik alan bölgesi oluşmasını sağlamaktadır. Yapılan testler, tek başına  $8 \mu\text{H}$  olan bobinlerin karşılıklı yerleşimiyle oluşan manyetik tünel etkisinin indüktansı artırdığını ( $29,86 \mu\text{H}$ 'ye yükselmesi) ve manyetik alan homojenliğini sağlayarak sistem hassasiyetini belirgin şekilde yükselttiğini kanıtlamıştır. Bu sayede, hava kabarcığı veya metal partikül geçişlerinde bobin endüktansındaki değişimlerin rezonans frekansında daha belirgin kaymalara yol açması sağlanmıştır. Özellikle iç içe seri yapıli bobin tasarımı, manyetik alanı yoğunlaştırarak daha yüksek algılama hassasiyeti elde etmek amacıyla geliştirilmiş ve LCR metre ölçümlerinde  $9\text{--}10 \mu\text{H}$  indüktans ve yaklaşık  $80^\circ$  pozitif faz farkı üreterek endüktif karakterde çalıştığı doğrulanmıştır. İç içe bobin konfigürasyonunun (iki adet) hem indüktans ( $31\text{--}32 \mu\text{H}$ ) hem de kalite faktörü ( $100 \text{ kHz}$ 'de  $8\text{--}9$  aralığı) bakımından üstün performans sergilediği LCR metre ölçümleriyle belirlenmiştir.

Mekanik yenilikler açısından bakıldığında, sistem, ilk dağınık ve kablolu laboratuvar prototipinden, tüm elektronik ve mekanik bileşenleri entegre eden kompakt ve taşınabilir bir nihai prototipe evrilmiştir. Nihai tasarım, yaklaşık  $11 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$  yüzey



Şekil 4.52. Algılanabilen metal partikül boyutlarını gösteren görsel



Şekil 4.53. Hortum içerisinden geçen hava kabarcığı, bakır ve metal partiküllerin PCB bobinler arasından geçişinin örnek gösterimi

alanına ve 8 cm boyuna sahip bir kutu yapısına sahiptir, bu da taşıma kolaylığı ve serum hortumlarına doğrudan entegrasyon imkanı sunar. Klipsli sabitleme mekanizması hortumun güvenli yerleşimini sağlarken, manyetik konnektörler sayesinde hızlı montaj ve sökme imkanı sunulmuştur. 3D yazıcı ile PLA filament kullanılarak üretilen kutunun iç yüzeyi, elektromanyetik girişimlerden korunmak amacıyla alüminyum kaplama ile Faraday kafesi etkisi oluşturacak şekilde yalıtılmıştır, bu da ölçüm güvenilirliğini artırmıştır.

Yazılımsal, elektroniksel ve MCU-haberleşme yöntemleri, sistemin işlevselliği ve kullanıcı etkileşimi için kritik bileşenlerdir. Algılama sistemi, düzlemsel bobinlerden oluşan bir LC rezonatör devresi kullanır. Manyetik alan/endüktans değişimlerinden kaynaklanan frekans kaymalarını dijital sinyallere çevirmek için Frekans Dijital Dönüştürücü (FDD) tercih edilmiştir. Bu entegre, dar bantlı mimarisi sayesinde elektromanyetik girişimlere (EMI) karşı yüksek dayanıklılık göstermektedir ve gürültü seviyesini minimuma indirerek hassas ölçümler yapabilmektedir. Gerçek zamanlı analiz ve sistem yönetimi için STM32F103 modeli mikrodenetleyici kullanılmıştır. ARM Cortex-M3 tabanlı bu MCU, 72 MHz işlemci frekansı, 1 MB'a kadar Flash bellek ve 96 KB'a kadar RAM kapasitesi ile hızlı veri işleme ve gerekli sinyal işleme algoritmalarını karşılayabilmektedir. Ayrıca I2C ve SPI gibi dijital haberleşme protokollerini aynı anda yönetebilme yeteneğine sahiptir. Sistemde ESP32 Wi-Fi modülü entegre edilmiştir. Bu modül, HMI (İnsan-Makine Arayüzü) olarak işlev görmekte ve LCD ekran üzerinden hava kabarcığı veya metal partikül tespiti durumlarını anlık olarak kullanıcıya sunmaktadır. STM32F103 ile SPI protokolü üzerinden haberleşen ESP32, aynı zamanda TCP/IP protokolü ile bilgisayardaki C# tabanlı arayüz uygulamasına sürekli veri iletimi sağlayarak uzaktan izleme olanağı sağlamaktadır. Tüm bu bulgular, geliştirilen manyetik algılama sisteminin hem medikal IV hatları hem de endüstriyel sıvı transfer sistemleri için sağlam, tekrarlanabilir ve uygulamaya hazır bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

### 4.3. Öneriler

İleride yapılacak çalışmalarda, sensör verilerinin gerçek-zamanlı analizinde kuantize *TinyML* (CNN/LSTM) modelleri kullanılarak akışkan tipine ve gürültü seviyesine kendini uyarlayan eşik mekanizmaları geliştirilebilir; ayrıca dalgacık temelli çok-çözünürlüklü filtreleme uygulanarak düşük hacimli kabarcık sinyalleri daha seçici

biçimde ayrıştırılabilir ve bu sayede algılama sınırları aşağı çekilebilir. Yazılım tarafındaki bu iyileştirmelere paralel olarak FDD, MCU, güç yönetimi ve kablosuz haberleşme katmanlarının tek bir baskı devrede bütünleştirilmesiyle parazitik empedans azaltılabilir, diferansiyel izleme ve çok katmanlı toprak düzlemleri eklenerek EMI bağışıklığı güçlendirilebilir ve kart alanı yaklaşık %40 küçültülebilir. Mekanik tarafta ise PLA yerine biyouyumlu ve manyetik geçirgenliği düşük PEI/PPSU malzemelerin kullanılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Aydoğdu, O., Soylu, S. ve ankaya, N., 2019, İnsülin infüzyon setleri için hava kabarcığı tespit sistemi ve tespit yöntemi, <https://www.turkpatent.gov.tr/arastirma-yap?form=patent> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].
- Beigel, J., 2018, Introduction to LDC and its technology, TI Precision Labs - Inductive Sensing, Teknik Rapor.
- Cecco, V., Drunen, G. ve Sharp, F., 1981, Eddy current testing manual on eddy current method.
- Instruments, T., 2016, LDC EVM User's Guide, Teknik Rapor, <https://www.ti.com/lit/ug/snou135a/snou135a.pdf> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].
- Instruments, T., 2018, Multi-channel 28-bit inductance to digital converter (LDC) for inductive sensing, <https://www.ti.com/lit/gpn/ldc1614> [Ziyaret Tarihi: 25 Mayıs 2025].
- Kasemsadeh, B., 2015, LDC linear position sensing, Teknik Rapor, [www.ti.com](http://www.ti.com) [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].
- Kamen, D. E., 1991, Intravenous fluid delivery system with air elimination, *United States Patent*, 341:451.
- Namery, J. , 1976, Ultrasonic bubble detector , *United States Patent*, 3,974,681 .
- Bai, C., Zhang, H., Wang, W., Zhao, X., Chen, H. ve Zeng, N., 2020, Inductive-capacitive dual-mode oil detection sensor based on magnetic nanoparticle material, *IEEE Sensors Journal*, 20:12274–12281.
- Ilerioluwa, L., Zhang, H., Bai, C., Wang, C., Zheng, Y., Wang, X., Sun, Y. ve Guobin, L., 2022, A multi-parameter microfluidic particle sensor based on permalloy for high sensitivity, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 71.
- Mabe, J., Zubia, J. ve Gorritxategi, E., 2017, Photonic low cost micro-sensor for in-line wear particle detection in flowing lube oils, *Sensors*, 17:586.
- McCarthy, C. J., Behraves, S., Naidu, S. G. ve Oklu, R., 2016, Air embolism: Practical tips for prevention and treatment, *Journal of Clinical Medicine*, 5:93.
- Quoc, T. V., Dac, H. N., Quoc, T. P., Dinh, D. N. ve Duc, T. C., 2015, A printed circuit board capacitive sensor for air bubble inside fluidic flow detection, *Microsystem Technologies*, 21:911–918.
- Salmaz, U., Ahsan, M. A. ve Islam, T., 2021, High-precision capacitive sensors for intravenous fluid monitoring in hospitals, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70.

- Shi, H., Zhang, H., Wang, W., Wang, M. ve Zeng, L., 2019, Research on a novel method for detection of wear debris in hydraulic oil, *Yi Qi Yi Biao Xue Bao / Chinese Journal of Scientific Instrument*, 40:44–51.
- Uc-Martín, J. A. ve Ramírez-Chavarría, R. G., 2023, Variable-capacitance measurement system to detect sodium dodecyl sulfate in pure liquids, *IEEE Sensors Letters*, 7(5):1–4.
- Wilkins, R. G. ve Unverdorben, M., 2012, Accidental intravenous infusion of air: A concise review, *Journal of Infusion Nursing*, 35:404–408.
- Yavsan, E., 2024, Inductive sensing of air bubbles in intravenous fluids: A novel approach for patient safety, *Flow Measurement and Instrumentation*, s. 1–8.
- Yuan, J., Li, Z., Ma, Q., Li, J., Li, Z., Zhao, Y., Qin, S., Shi, X., Zhao, L., Yang, P., Luo, G., Wang, X., Teh, K. S. ve Jiang, Z., 2023, Noninvasive fluid bubble detection based on capacitive micromachined ultrasonic transducers, *Microsystems and Nanoengineering*, 9:1–12.
- Zhang, H., Li, J., Wen, B., Xun, Y. ve Liu, J., 2018, Connecting intelligent things in smart hospitals using NB-IoT, *IEEE Internet of Things Journal*, 5:1550–1560.
- Zhang, H. X., Hou, Y. L., Feng, L. S., Su, S., Zhang, J. W., Liu, J., Liu, W. Y., Liu, J. ve Xiong, J. J., 2015, Polymer optical fiber continuous liquid level sensor for dynamic measurement, *IEEE Sensors Journal*, 15:5238–5242.
- Quoc, T. V., Quoc, T. P., Duc, T. C., Bui, T. T., Kikuchi, K. ve Aoyagi, M., 2014, Capacitive sensor based on PCB technology for air bubble inside fluidic flow detection, *Proc. of IEEE Sensors*, 2014-December:237–240.
- Shalalkeh, H., Ideas, R. ve Arman, A., 2012, Design and implementation of an air bubble detector using an ultrasound principle with audible alarm, *PPU College Of Engineering and Technology*.
- Amazon, 2025, Marhynchus peristaltik sıvı pompası, <https://www.amazon.com.tr/Marhynchus-Peristaltik-Laboratuvar-Dakikada-pompalar> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].
- EDN, 2024, Optical air bubble sensor – EDN, <https://www.edn.com/optical-air-bubble-sensor/> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].
- Endüstri, O., 2025, Peristaltik hortum pompalar, Omni Endüstri, <https://www.omniendustri.com/peristaltik-hortum-pompalar,2,30401> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].
- Instrument, T., 2025, Coil Designer, <https://webench.ti.com/wb5/LDC//spirals> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].

- Landry, J., 2024, How long for an air embolism to kill you, <https://www.respiratorytherapyzone.com/how-long-air-embolism-death/> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].
- ST, 2025, STM32 Microcontrollers, <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> [Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2025].